



**Ricardo Alexandre Lopes Moreira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Turbina Darrieus Numa Plataforma Aérea Por Efeito Magnus**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Pedro Miguel Marques dos Santos Silva, Mestre em Engenharia Mecânica, Omnidea – Aerospace Technology and Energy Systems

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor António José Freire Mourão
Arguente:	Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz
Vogal:	Prof. Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2017**



**Ricardo Alexandre Lopes Moreira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Turbina Darrieus Numa Plataforma Aérea Por Efeito Magnus**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de  
Lisboa

Co-orientador: Pedro Miguel Marques dos Santos Silva, Mestre em  
Engenharia Mecânica, Omnidea – Aerospace Technology  
and Energy Systems

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor António José Freire Mourão
Arguente:	Prof. Doutor Daniel Cardoso Vaz
Vogal:	Prof. Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho

**Setembro 2017**



## **Turbina Darrieus Numa Plataforma Aérea Por Efeito Magnus**

Copyright © Ricardo Alexandre Lopes Moreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

Quero agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Alberto Martinho, por toda a disponibilidade, prontidão, pelo aconselhamento e apoio prestado durante o decorrer da presente dissertação.

Ao Professor Doutor António Mourão, pela confiança depositada nas minhas capacidades e pelo acompanhamento ao longo destes meses.

A toda a equipa da empresa *Omnidea* pela forma como me acolheu e por todas as condições de trabalho que me ofereceram. Agradeço especialmente aos Engenheiros Pedro Silva e Tiago Moreira pela incansável dedicação, pelos ensinamentos do programa *OpenFOAM* e por todas as sugestões e conselhos que ajudaram a consolidar esta dissertação.

Ao corpo docente e não-docente do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa que convivi durante estes 5 anos de curso.

Aos colegas de curso, em especial ao Diogo Torrão e ao Pavel Gujea, que me acompanharam neste percurso académico demonstrando um grande espírito de amizade, entajuda e pelos momentos partilhados.

Aos meus amigos, que me acompanham desde sempre, pelo apoio e por acreditarem nas minhas capacidades.

À Catarina, que nestes últimos anos me apoiou, encorajou e sempre depositou em mim a sua força.

À minha família, especialmente ao meu pai, por todos os sacrifícios que fizeram por mim, pelos valores transmitidos ao longo da minha vida, pelas palavras de encorajamento e por tornarem possível a concretização desta etapa.

*Dedico esta dissertação à minha mãe  
pela força interior que me deu.*





# Resumo

Nos últimos anos, tem-se notado um forte investimento no aproveitamento da energia eólica para a obtenção de energia elétrica. O desenvolvimento tecnológico, a procura constante na rentabilização das energias renováveis e a preocupação com a sustentabilidade do planeta Terra conduzem a um novo paradigma energético.

Nesse sentido, pretende-se com este trabalho estudar a possibilidade de configurar uma turbina *Darrieus* rotor-H, de modo a desenvolver um novo modelo para uma plataforma aérea baseada no efeito *Magnus*, afim de rentabilizar o projeto lançado pela empresa *Omnidea*. Numa primeira aproximação, são formuladas duas famílias de configurações, tendo como princípio base o efeito *Magnus*, onde são discutidos e apresentados alguns parâmetros de funcionamento na perspectiva de potenciar o aproveitamento energético da turbina.

São realizadas simulações numéricas a quatro casos de estudo que simbolizam, numa primeira fase, o antigo e o novo modelo da plataforma aérea. Primeiro, simula-se um escoamento bidimensional em torno de um cilindro estacionário e, posteriormente, com o intuito de validar o efeito *Magnus*, simula-se um escoamento em torno de um cilindro em rotação para várias velocidades de vento e várias velocidades angulares. Depois, simula-se um escoamento bidimensional em torno das pás de uma turbina *Darrieus* rotor-H e, seguidamente, simula-se, juntamente com essas pás, um cilindro em rotação, cujo eixo de rotação coincide com o eixo de rotação da turbina. Os resultados obtidos são comparados, quando possível, com resultados de outros autores.

As simulações numéricas e aerodinâmicas são realizadas no programa *OpenFOAM*. Para além da bidimensionalidade, o escoamento também é turbulento, pelo que são apresentados os modelos de turbulência e os respetivos parâmetros usados em cada simulação. Através da resolução das equações de *Navier-Stokes*, o *OpenFOAM* determina as variações de velocidade e pressão do escoamento.

## Palavras-chave:

Efeito *Magnus*;

*OpenFOAM*;

Plataforma aérea;

Simulação;

Turbina *Darrieus* rotor-H.



# Abstract

In the past few years, there have been some increasingly significant investments on electricity production from wind energy. The technological development, the constant search for the profitability of renewable energies and the concern about the sustainability of planet Earth lead to a new energy paradigm.

The purpose of this project is to study the possibility of configuring a Darrieus H-rotor turbine, in order to develop a new model for an airborne platform based on the Magnus effect to profitably improve the design launched by Omnidea company. Therefore, two groups of configurations are formulated initially, having as base principle the Magnus effect, where some parameters of operation are discussed and presented in order to optimize the energy generation of the turbine.

Numerical simulations are performed on four study cases that symbolize the old and the new model of the airborne platform. First, a two-dimensional flow is simulated around a stationary cylinder, then, in order to validate the Magnus effect, a flow is simulated around a rotating cylinder at several wind speeds and angular velocities. Then, a two-dimensional flow is simulated around the blades of a Darrieus H-rotor turbine and after this, the same blades are simulated with a rotating cylinder sharing the same axis as the turbine's rotation axis. These outcomes are compared, when possible, with the outcomes of other authors.

Numerical and aerodynamic simulations are performed in OpenFOAM software. Besides being the two-dimensionality, the flow is also turbulent, so the turbulence models and the respective parameters used in each simulation are presented. The OpenFOAM software solving the variations of the velocity and pressure of the flow, by solving the Navier-Stokes equations.

## Key-words:

Airborne platform;

Darrieus H-rotor type turbine;

Magnus effect;

OpenFOAM;

Simulation.



# Índice

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Motivação .....	4
1.3	Objetivos.....	5
1.4	Organização da Dissertação .....	5
2	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE .....	7
2.1	A Contribuição das Energias Renováveis para um Desenvolvimento Sustentável.....	7
2.2	Energia Eólica .....	8
2.3	Turbinas Eólicas .....	10
2.4	Turbinas Eólicas de Eixo Vertical.....	13
2.5	Fundamentos Teóricos de uma Turbina Darrieus Rotor-H.....	14
3	PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA DARRIEUS ROTOR-H .....	21
3.1	Apresentação do Novo Modelo da Plataforma Aérea.....	21
3.2	Tip Speed Ratio, TSR .....	26
3.3	Número de Pás.....	29
3.4	Solidez (Solidity) e Corda da Pá .....	31
3.5	Perfil das Pás .....	33
4	INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	35
4.1	Funcionamento do Programa OpenFOAM .....	36
4.2	Modelação Matemática e Métodos de Discretização.....	36
4.3	Códigos Numéricos .....	38
4.4	Esquemas Numéricos e Algoritmos de Resolução .....	39
4.5	Número de Courant.....	41
5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DO CILINDRO .....	43
5.1	Geração da Malha e Limites dos Domínios .....	44
5.2	Modelo de Turbulência, Condições de Fronteira e Iniciais .....	46
5.3	Outros Parâmetros da Simulação Numérica.....	50
5.4	Apresentação de Resultados .....	53
5.4.1	Escoamento em Torno de Um Cilindro Estacionário .....	53

5.4.2	Escoamento em Torno de Um Cilindro em Rotação.....	59
6	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DA TURBINA .....	73
6.1	Geração da Malha e Limites dos Domínios .....	74
6.2	Modelo de Turbulência, Condições de Fronteira e Iniciais .....	81
6.3	Outros Parâmetros da Simulação Numérica.....	84
6.4	Apresentação de Resultados .....	85
6.4.1	Escoamento em Torno das Pás da Turbina Darrieus Rotor-H .....	85
6.4.2	Escoamento em Torno das Pás da Turbina Darrieus Rotor-H com Um Cilindro em Rotação .....	92
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	95
7.1	Conclusão.....	95
7.2	Trabalhos Futuros .....	97
	Referências Bibliográficas .....	99

# Índice de Figuras

Figura 1.1 – Campo de linhas de corrente em torno de um cilindro em rotação [3].	1
Figura 1.2 – Visualização esquemática do efeito Magnus na plataforma aérea. As linhas a tracejado correspondem às trajetórias da plataforma aérea [5].	3
Figura 1.3 – Visualização da preparação de um dos ensaios experimentais realizado pela Omnidea, na base da OTA [3].	3
Figura 2.1 – Desenvolvimento histórico, desde 1971 até 2014, do consumo de energia mundial por fonte de energia (Mtep). Adaptado de [7].	7
Figura 2.2 – Evolução da velocidade média do vento (em nós) para 120m e 600m de altitude, respetivamente [10].	9
Figura 2.3 – Evolução desde 2004 até 2014, da capacidade de aproveitamento da energia eólica a nível mundial [11].	10
Figura 2.4 – Comparação entre as duas categorias de turbinas eólicas, segundo o seu eixo de rotação: a) horizontal; b) vertical. Adaptado de [14].	10
Figura 2.5 – Coeficiente de potência, $C_p$ , em função do TSR, para os vários tipos de turbinas eólicas. Adaptado de [18].	11
Figura 2.6 – Curva do potencial eólico e curva característica de uma turbina eólica. Adaptado de [20].	12
Figura 2.7 – Diferentes tipos de turbinas eólicas de eixo vertical: a) Turbinas Savonius; b) Turbina Darrieus; c) Turbina Darrieus rotor-H. Adaptado de [19].	13
Figura 2.8 – Distribuição dos vetores de velocidade e de força aplicados numa das pás da turbina Darrieus rotor-H.	15
Figura 2.9 – Representação dos vetores de velocidade para diferentes ângulos de azimute, $\theta$ . Adaptado de [23].	15
Figura 2.10 – Círculo trigonométrico com a representação do ângulo ( $\theta - 90^\circ$ ).	16
Figura 2.11 – Variação da velocidade relativa, $V_{rel}$ , em função do ângulo de azimute, $\theta$ .	17
Figura 2.12 – Variação do ângulo de ataque, $\alpha$ , em função do ângulo de azimute, $\theta$ , para diferentes valores de TSR.	18
Figura 3.1 – Representação esquemática da família de configurações A.	21
Figura 3.2 – Representação esquemática da família de configurações B.	22
Figura 3.3 – Variação do TSR, de acordo com a velocidade do vento, $V_\infty$ .	27
Figura 3.4 – Distribuição probabilística do vento para o local de funcionamento da turbina.	28
Figura 3.5 – Variação do coeficiente de potência, $C_p$ , em função do TSR, tendo em conta o diferente número de pás da turbina [25].	30
Figura 3.6 – Variação da direção e da intensidade do somatório das forças aerodinâmicas para $N = 2$ e $N = 3$ consoante a rotação da turbina [19, 26].	31
Figura 3.7 – Variação do coeficiente de potência, $C_p$ , em função do TSR, para diferentes valores de solidez, $\sigma$ [28].	32

Figura 3.8 – Variação do rácio $\kappa$ , em função do ângulo de ataque, $\alpha$ , para diferentes espessuras relativas, $RT$ [25].	33
Figura 3.9 – Variação do coeficiente de potência, $C_p$ , em função do TSR para diferentes perfis NACA [14].	34
Figura 5.1 – Representação esquemática das simulações que se destinam a cada caso de estudo.	43
Figura 5.2 – Representação da malha usada na simulação do cilindro gerada no programa Gmsh: a) Domínio computacional; b) Malha junto às paredes do cilindro.	45
Figura 5.3 – Apresentação dos resultados do coeficiente de arrasto das simulações 1 e 2.	53
Figura 5.4 – Apresentação dos resultados do coeficiente de sustentação das simulações 1 e 2.	54
Figura 5.5 – Apresentação em pormenor das amplitudes e dos períodos de cada simulação referentes ao coeficiente de arrasto.	55
Figura 5.6 – Apresentação em pormenor das amplitudes e dos períodos de cada simulação referentes ao coeficiente de sustentação.	55
Figura 5.7 – Intensidade das componentes: a) velocidade; b) pressão relativa; $Re = 5,3 \times 10^5$ .	57
Figura 5.8 – Intensidade das componentes: a) velocidade; b) pressão relativa; $Re = 8 \times 10^5$ .	57
Figura 5.9 – Resultados numéricos e experimentais. Adaptado de [39].	57
Figura 5.10 – Apresentação dos coeficientes de sustentação, $C_l$ , para cada TSR.	59
Figura 5.11 – Comparação do $C_l$ entre os resultados obtidos nos dois trabalhos. Adaptado de [40].	60
Figura 5.12 – Apresentação dos coeficientes de arrasto, $C_D$ , para cada TSR.	62
Figura 5.13 – Comparação do $C_D$ entre os resultados obtidos nos dois trabalhos. Adaptado de [40].	63
Figura 5.14 – Intensidade da velocidade do escoamento para diferentes valores de TSR.	64
Figura 5.15 – Intensidade da pressão relativa do escoamento para diferentes valores de TSR.	64
Figura 5.16 – Variação do coeficiente de pressão ao longo da superfície do cilindro.	65
Figura 5.17 – Evolução do coeficiente de sustentação para vários valores de TSR.	67
Figura 5.18 – Intensidade da pressão relativa do escoamento para diferentes valores de TSR.	68
Figura 5.19 – Evolução do coeficiente de arrasto para vários valores de TSR.	69
Figura 5.20 – Momento devido às forças viscosas do cilindro para várias velocidades de vento.	70
Figura 6.1 – Representação esquemática das simulações que se destinam a cada caso de estudo.	73
Figura 6.2 – Variação do número de Reynolds local ao longo da rotação das pás da turbina.	75
Figura 6.3 – Variação do número de Reynolds local ao longo da rotação das pás da turbina.	75
Figura 6.4 – Geometria do perfil de uma das pás e a malha à sua superfície.	76



Figura 6.5 – Geometria do domínio que possui movimento de rotação. ....	77
Figura 6.6 – Domínio retangular.....	78
Figura 6.7 – Apresentação de todos os domínios da simulação. ....	78
Figura 6.8 – Proporções de todos os domínios da simulação do primeiro caso de estudo. ....	79
Figura 6.9 – a) Perspetiva do domínio que possui movimento de rotação; pormenor da camada limite junto à superfície do cilindro b). ....	79
Figura 6.10 – Proporções de todos os domínios da simulação do segundo caso de estudo. ...	80
Figura 6.11 – Apresentação do somatório do momento devido às forças de pressão aplicado nas pás da turbina para cada TSR. ....	86
Figura 6.12 – Apresentação do somatório do momento devido às forças viscosas aplicado nas pás da turbina para cada TSR. ....	87
Figura 6.13 – Evolução dos momentos médios versus a velocidade do vento. ....	88
Figura 6.14 – Variação da velocidade do escoamento ao longo da rotação das pás ( $TSR = 4$ ). ....	89
Figura 6.15 – Variação da pressão relativa do escoamento ao longo da rotação das pás ( $TSR = 4$ ). ....	89
Figura 6.16 – Coeficiente de potência médio versus Tip Speed Ratio. ....	90
Figura 6.17 – Coeficiente de sustentação referente ao segundo caso de estudo da turbina. ...	92
Figura 6.18 – Momento devido às forças viscosas do cilindro referente ao segundo caso de estudo da turbina. ....	93
Figura 6.19 – a) Variação da intensidade da velocidade do escoamento; b) Variação da pressão relativa do escoamento. ....	94



# Índice de Tabelas

Tabela 3.1 – Condições iniciais para a análise deste caso específico. ....	23
Tabela 3.2 – Valores de <i>TSR</i> de acordo com as condições iniciais (50RPM). ....	23
Tabela 3.3 – Valores de <i>TSR</i> de acordo com as condições iniciais (25RPM). ....	23
Tabela 3.4 – Coeficientes de potência de acordo com os valores da Tabela 3.2 (50RPM). ....	24
Tabela 3.5 – Coeficientes de potência de acordo com os valores da Tabela 3.3 (25RPM). ....	24
Tabela 3.6 – Valores do comprimento das pás versus o diâmetro da turbina. ....	25
Tabela 3.7 – Valores do comprimento das pás versus o diâmetro da turbina. ....	25
Tabela 4.1 – Esquemas de discretização e de interpolação do OF utilizados nas simulações. ....	40
Tabela 4.2 – Linear-solvers, smoother e pré-condicionador do OF utilizados nas simulações. ....	41
Tabela 5.1 – Características das simulações para o caso do cilindro. ....	44
Tabela 5.2 – Tipos de condições de fronteira atribuídas aos limites dos domínios no caso do cilindro. ....	46
Tabela 5.3 – Apresentação dos resultados das equações de transporte <i>k</i> e <i>omega</i> . ....	48
Tabela 5.4 – Condições iniciais e respectivas condições de fronteira. ....	49
Tabela 5.5 – Alteração da condição de fronteira à condição inicial da velocidade do escoamento. ....	50
Tabela 5.6 – Parâmetros da simulação numérica relativos ao tempo de simulação. ....	51
Tabela 5.7 – Bibliotecas do <i>OpenFOAM</i> utilizadas nas simulações do caso do cilindro. ....	51
Tabela 5.8 – Parâmetros impostos no OF para o cálculo das funções <i>forces</i> e <i>forceCoeffs</i> . ....	52
Tabela 5.9 – Características das duas simulações referentes ao escoamento em torno do cilindro estacionário. ....	53
Tabela 5.10 – Apresentação dos valores do coeficiente de arrasto. ....	58
Tabela 5.11 – Apresentação das forças de arrasto obtidas neste trabalho. ....	58
Tabela 5.12 – Características das quatro primeiras simulações referentes ao escoamento em torno de um cilindro em rotação. ....	59
Tabela 5.13 – Apresentação dos resultados dos coeficientes de sustentação obtidos neste trabalho e no artigo [40]. ....	61
Tabela 5.14 – Apresentação dos resultados dos coeficientes de arrasto obtidos neste trabalho e no artigo [40]. ....	63
Tabela 5.15 – Apresentação das forças de arrasto e de sustentação obtidas neste trabalho. ....	66
Tabela 5.16 – Características das últimas três simulações referentes ao escoamento em torno do cilindro em rotação. ....	67
Tabela 5.17 – Apresentação dos coeficientes e forças aerodinâmicas em cada simulação. ....	69
Tabela 5.18 – Apresentação do momento devido às forças viscosas médio e da potência média necessária a fornecer ao cilindro. ....	71
Tabela 6.1 – Características das simulações para o caso da turbina. ....	73
Tabela 6.2 – Parâmetros das pás da turbina <i>Darrieus</i> rotor-H. ....	74

Tabela 6.3 – Tipos de condições de fronteira atribuídas aos limites dos domínios no caso da turbina.....	80
Tabela 6.4 – Apresentação dos valores das condições iniciais do modelo de turbulência para os vários limites dos domínios. ....	82
Tabela 6.5 – Condições iniciais e respetivas condições de fronteira. ....	83
Tabela 6.6 – Parâmetros da simulação numérica relativos ao tempo de simulação.....	84
Tabela 6.7 – Biblioteca adicional do <i>OpenFOAM</i> utilizada no caso da turbina. ....	84
Tabela 6.8 – Parâmetros relativos à malha em rotação. ....	85
Tabela 6.9 – Características das simulações referentes ao escoamento em torno das pás da turbina.....	85
Tabela 6.10 – Apresentação dos cálculos baseados nos resultados obtidos. ....	90
Tabela 6.11 – Características da simulação para o segundo caso de estudo da turbina. ....	92

# Lista de Abreviaturas e Siglas

CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
Mtep	Megatoneladas equivalente de petróleo
MVF	Método dos Volumes Finitos
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
OF	<i>OpenFOAM</i>
PIMPLE	<i>Pressure-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit Split-Operator</i>
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>
RPM	Rotações por minuto
RT	<i>Relative Thickness</i>
SI	Sistema Internacional
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
VC	Volume de Controlo



# Lista de Símbolos

## Caracteres Latinos

$A$	Amplitude
$A_{ref}$	Área de referência do cilindro
$A_t$	Área total de um dado elemento de malha
$A_v$	Área varrida pelas pás num plano perpendicular ao escoamento
$\bar{B}$	Binário médio
$c$	Comprimento da corda da pá
$C$	Fator de escala
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$\overline{C_D}$	Coefficiente de arrasto médio
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$\overline{C_L}$	Coefficiente de sustentação médio
$C_p$	Coefficiente de potência
$\overline{C_p}$	Coefficiente de potência médio
$C_{pr}$	Coefficiente de pressão
$C_{p\text{ teórico}}$	Coefficiente de potência teórico
$C_o$	Número de <i>Courant</i>
$C_\mu$	Constante do modelo de turbulência <i>k – omega SST</i>
$C_{v1}$	Constante do modelo de turbulência <i>Spalart-Allmaras</i>
$D$	Diâmetro
$D_A$	Diâmetro da turbina na configuração A
$D_B$	Diâmetro da turbina na configuração B
$f$	Frequência
$f_c$	Termo para as forças aplicadas num corpo nas equações de <i>Navier-Stokes</i>
$f_{v1}$	Função de encerramento do modelo de turbulência <i>Spalart-Allmaras</i>
$F_D$	Força de arrasto
$\overline{F_D}$	Força de arrasto média
$F_L$	Força de sustentação
$\overline{F_L}$	Força de sustentação média
$F_N$	Força normal
$F_T$	Força tangencial
$\overline{F_T}$	Força tangencial média

$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Posição (em altura) do escoamento
$I$	Intensidade de turbulência
$k$	Energia cinética de turbulência
$k_f$	Fator de forma
$L$	Comprimento da pá
$L_{ref}$	Comprimento de referência do cilindro
$M_p$	Momento devido às forças de pressão
$M_v$	Momento devido às forças viscosas
$N$	Número de pás
$p$	Pressão
$p_{rel}$	Pressão relativa
$P_{eólico}$	Potência dada pela energia do vento
$P_{turbina}$	Potência mecânica das turbinas eólicas
$\bar{P}_{turbina}$	Potência média da turbina
$P(V_i)$	Probabilidade de ocorrer ao longo de um ano uma determinada velocidade de vento
$R$	Raio
$Re$	Número de <i>Reynolds</i>
$t$	Tempo
$T$	Período
$V$	Velocidade do escoamento local
$V_b$	Velocidade da pá da turbina
$V_{cut-in}$	Velocidade de entrada
$V_{cut-out}$	Velocidade de saída
$V_{mf}$	Velocidade mais frequente
$V_{rated}$	Velocidade nominal
$V_{rel}$	Velocidade relativa
$V_{rel}^n$	Velocidade relativa normal
$V_{rel}^t$	Velocidade relativa tangencial
$V_\infty$	Velocidade do escoamento não perturbado (velocidade do vento)
$x$	Eixo $x$ do referencial cartesiano
$y$	Eixo $y$ do referencial cartesiano
$z$	Eixo $z$ do referencial cartesiano



## Caracteres Gregos

$\alpha$	Ângulo de ataque da pá da turbina
$\beta$	Ângulo de rotação do cilindro
$\Delta_t$	Passo de tempo da simulação
$\Delta_x$	Espaçamento entre cada célula da malha
$\theta$	Ângulo de azimute
$\kappa$	Rácio entre a força de sustentação e a força de arrasto
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\rho$	Massa volúmica
$\sigma$	Solidez
$\tau$	Tensões de atrito viscosas
$\vec{\tau}_{Re}$	Termo do tensor de <i>Reynolds</i>
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\nu_t$	Viscosidade cinemática turbulenta
$\tilde{\nu}$	Modificador da viscosidade cinemática turbulenta
$\omega$	Velocidade angular
$\omega_t$	Taxa de dissipação específica de turbulência



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

A presente dissertação surge no âmbito de uma proposta apresentada pela empresa *Omnidea* que labora nas áreas da tecnologia aeroespacial e de sistemas de energia.

A proposta consiste em estudar a implementação de um novo modelo num projeto que a *Omnidea* já desenvolveu. Esse projeto é composto por uma plataforma aérea, constituída por um balão, com uma geometria cilíndrica (4m de diâmetro e 16m de comprimento), mais leve que o ar (insuflado com hélio) e, através do efeito *Magnus*, é capaz de atingir a alta altitude (até 600m).

O efeito *Magnus* permite criar uma força aerodinâmica de sustentação devido à imposição de uma velocidade angular a um objeto cilíndrico e à incidência, na superfície lateral deste, de um fluido a uma determinada velocidade [1, 2]. Dadas estas duas condições e, dependendo do sentido de rotação, como é representado na Figura 1.1, deparamo-nos com um aumento da velocidade do fluido na zona superior do cilindro e com uma diminuição da velocidade do fluido na zona inferior [2]. Na Figura 1.1 é possível observar uma secção transversal de um cilindro, com uma determinada velocidade angular,  $\omega$ , e a assimetria das linhas de corrente na zona superior e inferior do cilindro.

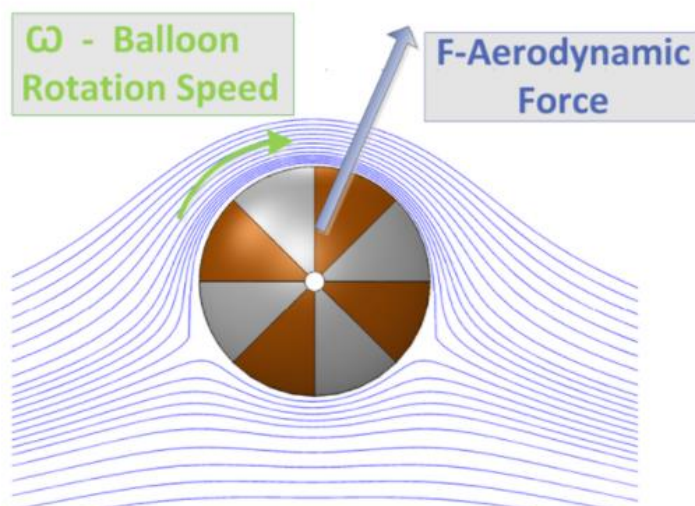


Figura 1.1 – Campo de linhas de corrente em torno de um cilindro em rotação [3].

A diferença de velocidades verificada nas duas zonas do cilindro implica um gradiente de pressões inverso. Ou seja, na zona superior do cilindro a pressão será menor, contrariamente à zona inferior do cilindro onde a pressão será maior. Este facto advém da equação de *Bernoulli*, representada na equação (1.1):

$$p + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho gh = c.^{te} \quad (1.1)$$

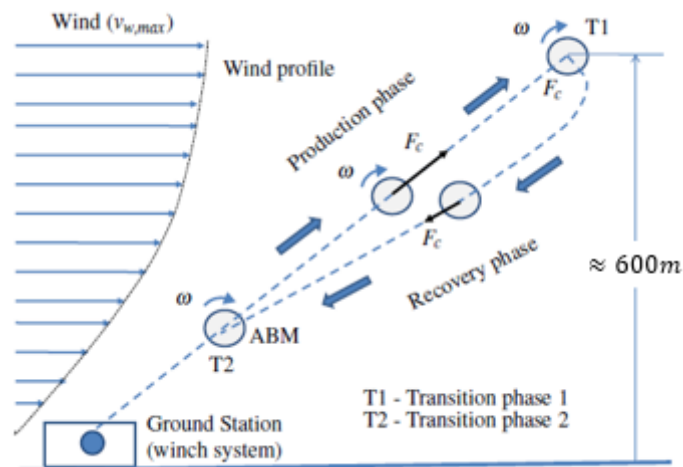
sendo que  $p$  simboliza o trabalho realizado, por unidade de volume, pelas forças de pressão,  $(\rho V^2)/2$  simboliza a energia cinética, por unidade de volume de fluido e  $\rho gh$  a energia potencial (ou de posição), por unidade de volume de fluido [4].

Devido à diferença de pressões nas duas zonas do cilindro, é criada uma força aerodinâmica de sustentação, perpendicular à direção da velocidade do escoamento. Esta força é diretamente proporcional à velocidade do fluido e à velocidade angular do cilindro.

Contextualizando para o projeto já desenvolvido pela *Omnidea*, a plataforma aérea, constituída pelo balão cilíndrico, tem como principais aplicações a observação da superfície do planeta Terra, a monitorização global, ambiental e de segurança, adquirir sistemas de informação geográfica, a validação de dados por satélite e criar sistemas de comunicação, especialmente em áreas onde não existem infraestruturas de telecomunicações. Por último e, sendo a principal razão deste trabalho, esta plataforma aérea é também capaz de produzir energia elétrica.

Como dito anteriormente, o conceito do efeito *Magnus* é aplicado na plataforma aérea. Durante a fase de descolagem, a partir de um determinado instante, o balão adquire uma velocidade angular por ação de um motor. Devido à incidência natural do vento na superfície lateral do balão, é criada uma força de sustentação e uma força de arrasto. A força de sustentação permite o movimento ascendente da plataforma aérea.

A plataforma aérea está segura por um cabo tracionado ligado a um guincho principal e este, por sua vez, ligado a um gerador elétrico, ambos presentes no solo. Através de movimentações ascendentes e descendentes da plataforma aérea, provocando o enrolamento e desenrolamento do cabo tracionado no guincho, é permitida a rotação do gerador elétrico e produz-se energia. Durante o processo ascendente ocorre a fase de produção de energia, onde a plataforma aérea está com uma determinada velocidade angular e a força aerodinâmica de sustentação, criada pelo efeito *Magnus*, permite a sua ascensão e faz desenrolar o cabo no guincho. Durante o movimento descendente ocorre a fase de recuperação, onde o balão é forçado a diminuir a sua velocidade angular, resultando numa diminuição abrupta da força aerodinâmica de sustentação, assim, com o mínimo esforço, é possível efetuar o enrolamento do cabo no guincho que se encontra no solo. A Figura 1.2 mostra as duas fases do processo e as trajetórias que a plataforma aérea realiza entre a alta e média altitude.



**Figura 1.2 – Visualização esquemática do efeito *Magnus* na plataforma aérea. As linhas a tracejado correspondem às trajetórias da plataforma aérea. Adaptado de [5].**

No entanto, a produção de energia obtida por este sistema é intermitente/cíclica. Ou seja, há um intervalo de tempo, correspondente à fase de recuperação, em que o gerador elétrico não produz energia. Nesta fase é necessário despendar alguma energia para o guincho efetuar o enrolamento do cabo tracionado que segura a plataforma aérea, provocando o seu movimento descendente. Logo, o sistema só produz energia quando se efetua o desenrolamento do cabo tracionado, correspondente à fase de produção. Dando por terminado as duas fases do processo, o balanço final da produção de energia é positivo, pois a fase de recuperação gasta apenas 20% da quantidade de energia produzida na fase de produção. Por outro lado, os fenómenos de enrolamento e desenrolamento do cabo provocam fadiga, pelo que ao fim de um determinado número de ciclos é necessário efetuar uma manutenção do cabo ou até substituí-lo.

Na Figura 1.3 é possível observar alguns dos componentes do projeto acima descrito, entre eles: o balão cilíndrico, o guincho principal próximo do gerador, um dos cabos que sustém a plataforma aérea e um guincho auxiliar que se encontra próximo do balão. A Figura 1.3 foi captada num dos ensaios experimentais que a empresa realizou na base da OTA, em Alenquer, Portugal.



**Figura 1.3 – Visualização da preparação de um dos ensaios experimentais realizado pela *Omnidea*, na base da OTA [3].**

Direcionando agora para o novo projeto que é proposto para a realização desta dissertação, o objetivo é alterar um pouco o modelo acima descrito. As alterações recaem, essencialmente, no sistema de produção de energia e, por conseguinte, na configuração da plataforma aérea. Numa primeira fase de estudo, o novo modelo da plataforma aérea passa a ser constituído, para além do balão cilíndrico, por uma turbina eólica de eixo vertical (TEEV), denominada turbina *Darrieus*. Assim, em vez de ocorrerem as movimentações ascendentes e descendentes, sucedendo a fase de produção e a fase de recuperação, neste caso pretende-se estudar a possibilidade de tornar a plataforma aérea suspensa/fixa a alta altitude, estabilizada por cabos tracionados que se encontram ligados a um guincho no solo.

Esta mudança de paradigma tem como objetivo solucionar os dois problemas acima mencionados. Ou seja, a produção de energia, agora efetuada pela turbina, deixa de ser cíclica, pois não é necessário despendar energia a enrolar o cabo que segura a plataforma aérea. Por outro lado, a fadiga no cabo é reduzida substancialmente.

## 1.2 Motivação

Num mundo constantemente alertado para as exigências ambientais, preocupado com as alterações climáticas, avisado para a escassez de recursos não-renováveis e alarmado para as condições de habitabilidade para as gerações futuras, é necessário refletir em alternativas sustentáveis e adequar ao máximo as energias renováveis às atividades da sociedade.

Com o intuito de minimizar as alterações climáticas, as emissões de gases poluentes para a atmosfera e o elevado consumo energético recorrendo a combustíveis fósseis, o desenvolvimento sustentável tem sido um tema importante para a consolidação de um novo conceito a aplicar no quotidiano. O último fator tem sido bastante utilizado pelo tipo de sociedade atual, pois o consumo energético tem vindo a registar um aumento significativo ao longo do tempo. Por essa razão, é essencial rentabilizar a utilização de recursos renováveis de modo a dar resposta, de um ponto de vista sustentável, ao estilo de vida atual.

Um dos objetivos, a médio e longo prazo da *Omnidea*, é produzir energia suficiente capaz de competir com as atuais turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH), ambicionando sempre, claro, superar esse desafio. Pois este projeto, apresenta um custo de produção e manutenção muito menor do que as TEEH, tornando-o bastante atrativo para uma alternativa sustentável na produção de energia. Por outro lado, devido às inúmeras funções associadas à plataforma aérea, este projeto pode vir a resultar num bom desenvolvimento tecnológico.

## 1.3 Objetivos

Primeiramente, um dos objetivos da presente dissertação é analisar todas as componentes das forças e velocidades que estão presentes nas pás de uma TEEV e o modo como estas evoluem ao longo do seu funcionamento.

Para além disso, outro objetivo recai sobre o estudo e reflexão, ainda que numa fase inicial, na possibilidade de configurar um novo modelo para a plataforma aérea. Isto é, desenvolver conceptualmente uma ou mais famílias de configurações e adapta-la(s) ao sistema do atual modelo genérico da plataforma aérea. Depois, avaliar do ponto de vista geométrico e energético, a viabilidade da utilização de uma turbina *Darrieus* rotor-H, no sentido de garantir para já, a sustentabilidade do projeto.

Posteriormente, outro objetivo é analisar alguns parâmetros de funcionamento da turbina, com o intuito de potencializar o seu aproveitamento energético.

Finalizando, estudar a resposta dos casos de estudo simulados, representando numa primeira aproximação, o antigo e o novo modelo da plataforma aérea e, apropriar a conclusão dos resultados obtidos à realidade dos projetos.

## 1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos: Introdução, Revisão do Estado da Arte, Parâmetros de Funcionamento da Turbina *Darrieus* Rotor-H, Introdução à Simulação Numérica, Simulação Numérica do Caso do Cilindro, Simulação Numérica do Caso da Turbina e, por último, Conclusão e Trabalhos Futuros.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento ao tema deste trabalho e ao projeto que a *Omnidea* desenvolveu e pretende desenvolver. São referenciados também os objetivos que sustentam esta dissertação.

No segundo capítulo são apresentados, essencialmente, os aspetos teóricos relacionados com as turbinas eólicas de eixo vertical; os esforços e as velocidades que atuam nas pás da turbina quando esta se encontra em funcionamento.

No terceiro capítulo é feita uma apresentação, numa primeira fase de estudo, das duas famílias de configurações que podem ser desenvolvidas para o novo modelo da plataforma aérea. É feita uma análise, do ponto de vista geométrico e energético, da utilização da turbina com o objetivo de garantir a sustentabilidade do projeto. Ainda no mesmo capítulo são apresentados alguns parâmetros de funcionamento da turbina *Darrieus* que mais adiante servem como *inputs* nas simulações.

No quarto capítulo é feita uma introdução ao programa *OpenFOAM* e descrito alguns parâmetros das simulações, como a modelação matemática, os métodos de discretização, os esquemas e códigos numéricos.

No quinto capítulo são definidos os parâmetros de simulação específicos para o caso do cilindro. As características da malha, as condições de fronteira e o modelo de turbulência. Depois disso, são apresentados os resultados obtidos para cada caso de estudo.

No sexto capítulo é apresentado o caso de estudo da turbina, onde também são definidos os seus parâmetros de simulação e os resultados obtidos.

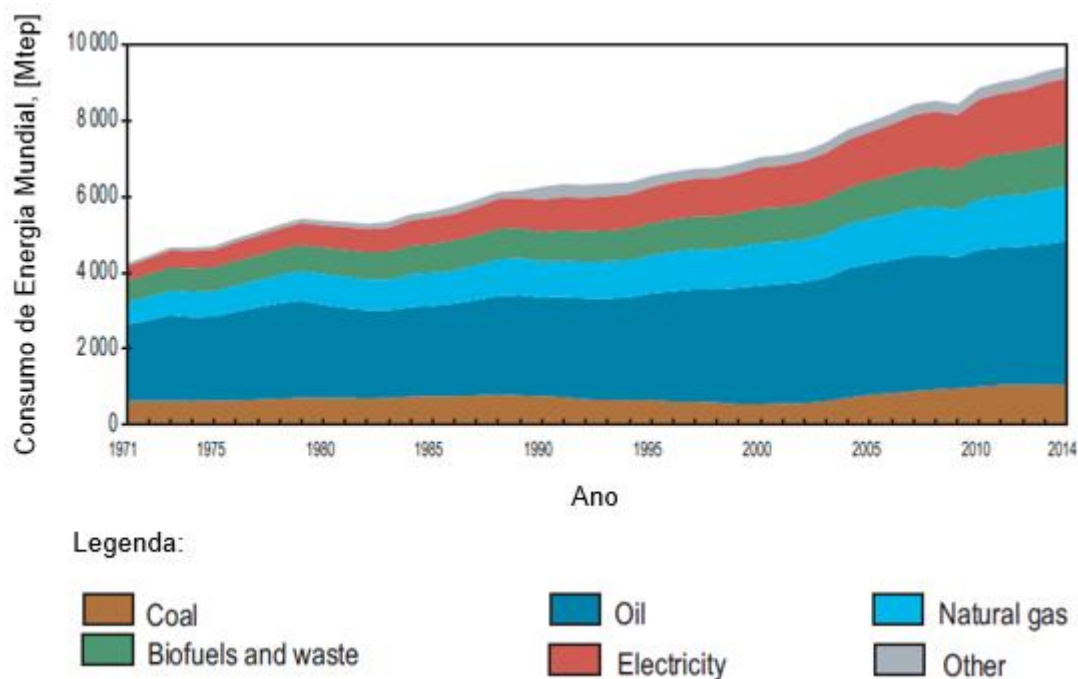
No sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para um trabalho futuro.



## 2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 A Contribuição das Energias Renováveis para um Desenvolvimento Sustentável

Desde o início da industrialização, o consumo de energia aumentou mais rapidamente do que o crescente aumento da população mundial. Desde 1870 a população mundial quadruplicou para os 6 mil milhões de habitantes que temos atualmente, enquanto que o consumo de energia aumentou por um fator de 60. No ano de 2000 uma pessoa consumia, em média, cerca de 15 vezes mais energia do que uma pessoa há 130 anos atrás [6]. A Figura 2.1 mostra o desenvolvimento histórico mundial, desde 1971 até 2014, do consumo de energia mundial por fonte de energia.



**Figura 2.1 – Desenvolvimento histórico, desde 1971 até 2014, do consumo de energia mundial por fonte de energia (Mtep). Adaptado de [7].**

Através da Figura 2.1, pode-se concluir que o consumo mundial de energia tem vindo a aumentar ao longo dos anos. A dependência da tecnologia, o aumento do nível de vida dos países desenvolvidos e o aumento contínuo da população nos países em desenvolvimento, resultam certamente, no aumento do consumo de energia [8]. Em consequência desse aumento de energia, e de modo a satisfazer as necessidades energéticas da sociedade atual, o consumo de combustíveis fósseis tem vindo gradualmente a aumentar ao longo dos anos, como comprovado na Figura 2.1.

Os combustíveis fósseis, para além de serem recursos não-renováveis, ao serem explorados no processo de combustão, possuem efeitos adversos para o meio ambiente e para o clima mundial. Por essa razão, a preocupação crescente em contrariar as alterações climáticas e encontrar soluções credíveis para substituir os combustíveis fósseis na produção de energia tem estado, constantemente, presente para a população mundial e para a comunidade científica. A consequência desse estado de alerta tem resultado, cada vez mais, na utilização de recursos renováveis para a produção de energia.

Porém, como em qualquer estudo de sustentabilidade, é fundamental avaliar se a energia que se consegue extrair de uma determinada tecnologia é superior àquela que é necessária para a produzir. Caso se verifique o contrário, essa tecnologia torna-se insustentável. Nesse sentido, é importante verificar o balanço energético quando utilizamos as energias renováveis para a produção de energia. Pois estas, não apresentam prejuízos ambientais para o planeta, tornando-se numa excelente alternativa para se caminhar a passos largos para um mundo sustentável.

## 2.2 Energia Eólica

A energia eólica corresponde à energia cinética de massas de ar. Essas massas de ar são postas em movimento devido à variação das forças de pressão que se estabelecem sempre que surgem alterações da massa volúmica do ar. Essas alterações devem-se a diferenças de temperatura ou de humidade, que resultam das condições locais distintas onde as massas de ar se encontram: natureza da superfície, a hora do dia, latitude, a época do ano, etc. Assim, o movimento das massas de ar é mantido maioritariamente pela radiação solar, que causa um aquecimento superficial diferenciado. Assim, pode-se adquirir a energia eólica a partir da energia solar, pelo que a energia eólica é um recurso energético renovável [9].

Relativamente ao aproveitamento da energia eólica, usualmente considera-se a sua conversão em energia mecânica, a qual se materializa num veio em rotação. Esta energia mecânica pode depois ser utilizada para diversos fins, incluindo a moagem de cereais nos tradicionais moinhos de vento, a bombagem de água de furos artesianos, ou a produção de eletricidade através das turbinas eólicas [9].

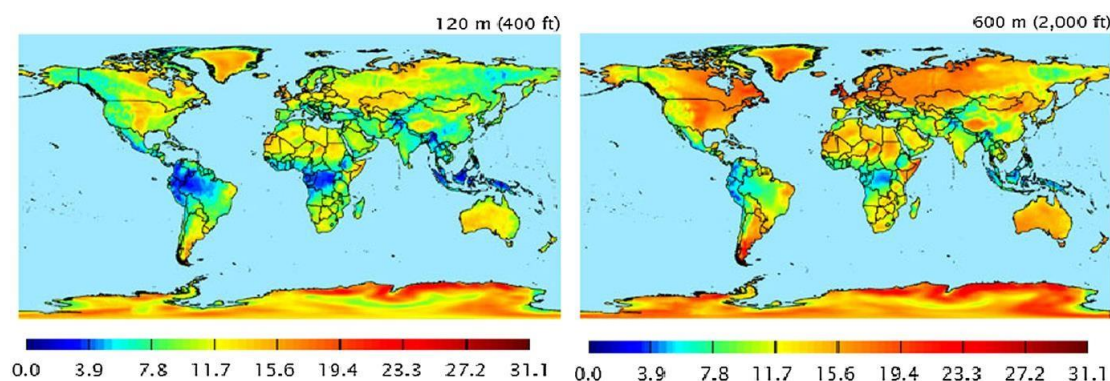
De notar, para a importância do vento no que diz respeito à potência de uma turbina eólica, pois esta é proporcional ao cubo da velocidade do vento:

$$P_{turbina} \propto V_{\infty}^3 \quad (2.1)$$

Assim, o estudo da variabilidade temporal e geográfica do vento numa dada região, torna-se fundamental para a viabilidade económica e para o aproveitamento energético de uma turbina eólica.

A variabilidade temporal do vento torna-se imprevisível para grandes escalas de tempo, uma vez que é difícil prever a disponibilidade do vento de um ano para o outro ou ao longo de períodos de décadas. No entanto, em pequenas escalas de tempo, por exemplo inferiores a um ano, a variabilidade temporal é mais previsível. Em escalas de tempo ainda mais reduzidas, da ordem do minuto, segundo, ou ainda menos, as variações da velocidade do vento estão associadas à turbulência. Estas variações têm efeito no projeto e desempenho das turbinas eólicas, bem como na qualidade da energia elétrica entregue à rede [9].

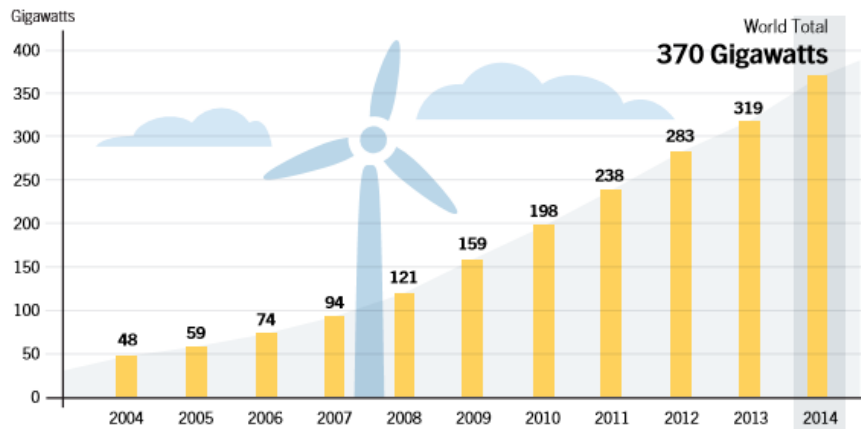
A variabilidade geográfica do vento está relacionada com a heterogeneidade da superfície terrestre, por exemplo a presença de montanhas altera a distribuição do vento. Outro ponto relacionado é a altitude. Pode-se constatar uma relação de proporcionalidade entre a velocidade média do vento e a altitude, como representado na Figura 2.2, onde consta a variação desta relação de proporcionalidade para duas altitudes distintas. Importa reforçar que os valores de interesse para caracterizar o vento numa dada região, nos oceanos ou mesmo em alta altitude correspondem a médias efetuadas ao longo de vários anos e de facto, o valor médio anual da velocidade do vento pode variar apreciavelmente de ano para ano.



**Figura 2.2 – Evolução da velocidade média do vento (em nós) para 120m e 600m de altitude, respetivamente [10].**

De salientar que uma das vantagens da produção de energia deste projeto, é o facto de este se situar a alta altitude, captando maiores valores de velocidade média do vento. Por outro lado, existe uma menor oscilação, tanto da intensidade como da direção do vento.

Devido ao avanço tecnológico das turbinas eólicas e à preocupação perante o atual panorama ambiental, tem-se constatado uma mudança de paradigma por parte da sociedade, sendo notório, ao longo dos anos, um maior aproveitamento da energia eólica para a produção de energia elétrica, como mostra a Figura 2.3, onde é possível observar a evolução desde o ano de 2004 até 2014 da capacidade de aproveitamento da energia eólica a nível mundial por parte das turbinas eólicas.



**Figura 2.3 – Evolução desde 2004 até 2014, da capacidade de aproveitamento da energia eólica a nível mundial [11].**

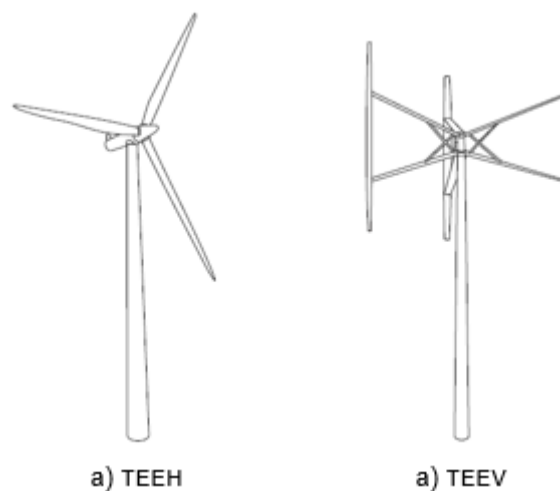
O potencial eólico é a potência dada pela energia do vento, numa dada área por unidade de tempo e é representado por:

$$P_{eólico} = \frac{1}{2} \rho A_v V_{\infty}^3 \quad (2.2)$$

sendo  $\rho$  a massa volúmica do ar,  $A_v$  a projeção num plano perpendicular ao escoamento da área varrida pelas pás e  $V_{\infty}$  corresponde à velocidade do vento não perturbado [12, 13].

## 2.3 Turbinas Eólicas

As turbinas eólicas podem ser classificadas em duas categorias, segundo a direção do seu eixo de rotação: turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) ou turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) [13, 14]. Na Figura 2.4 podemos visualizar, um exemplo, em que constam as duas categorias de turbinas eólicas.



**Figura 2.4 – Comparação entre as duas categorias de turbinas eólicas, segundo o seu eixo de rotação: a) horizontal; b) vertical. Adaptado de [14].**

As TEEV possuem algumas características particulares que se evidenciam relativamente às TEEH: maior facilidade de manutenção, transporte e montagem, menor custo de produção, são menos ruidosas e, principalmente, não necessitam de um alinhamento com a direção do vento.

A potência mecânica (potência no veio) das turbinas eólicas expostas a uma determinada velocidade de vento traduz-se na seguinte expressão:

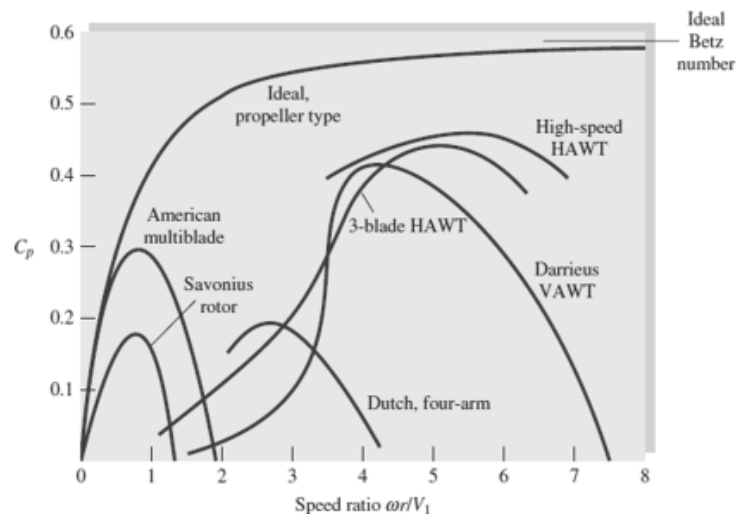
$$P_{turbina} = C_p \frac{1}{2} A_v \rho V_{\infty}^3 \quad (2.3)$$

onde  $C_p$  representa o coeficiente de potência da turbina. A eficiência aerodinâmica de uma turbina eólica está, normalmente, relacionada com o seu coeficiente de potência [15, 16].

O coeficiente de potência de uma turbina eólica é, frequentemente, associado em função do *Tip Speed Ratio*,  $TSR$ . É um parâmetro adimensional e corresponde, neste caso, à relação entre a velocidade angular das pás de uma turbina eólica, e a velocidade do vento:

$$TSR = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (2.4)$$

sendo que  $\omega$  é a velocidade angular da pá de uma turbina e  $R$  o raio da turbina (desde o eixo de rotação da turbina até à corda da pá) [16, 17]. Na Figura 2.5 consta o coeficiente de potência,  $C_p$ , em função dos valores típicos de  $TSR$ , para os vários tipos de turbinas eólicas. De notar, que o intervalo de valores do coeficiente de potência e do  $TSR$  apresentados na Figura 2.5 para cada tipo de turbina são valores médios, pois existem subcategorias de turbinas eólicas, cujas curvas variam ligeiramente. É importante olhar para a curva característica da turbina eólica *Darrieus*, pois sendo esta uma TEEV, o valor do coeficiente de potência máximo,  $C_{p\text{ máx}}$ , é apenas superado pelas TEEH.



**Figura 2.5 – Coeficiente de potência,  $C_p$ , em função do  $TSR$ , para os vários tipos de turbinas eólicas. Adaptado de [18].**

Na Figura 2.5, é possível observar o limite de *Betz* que corresponde ao valor teórico do coeficiente de potência,  $C_{p\text{ teórico}}$ , e é dado pela seguinte expressão [18]:

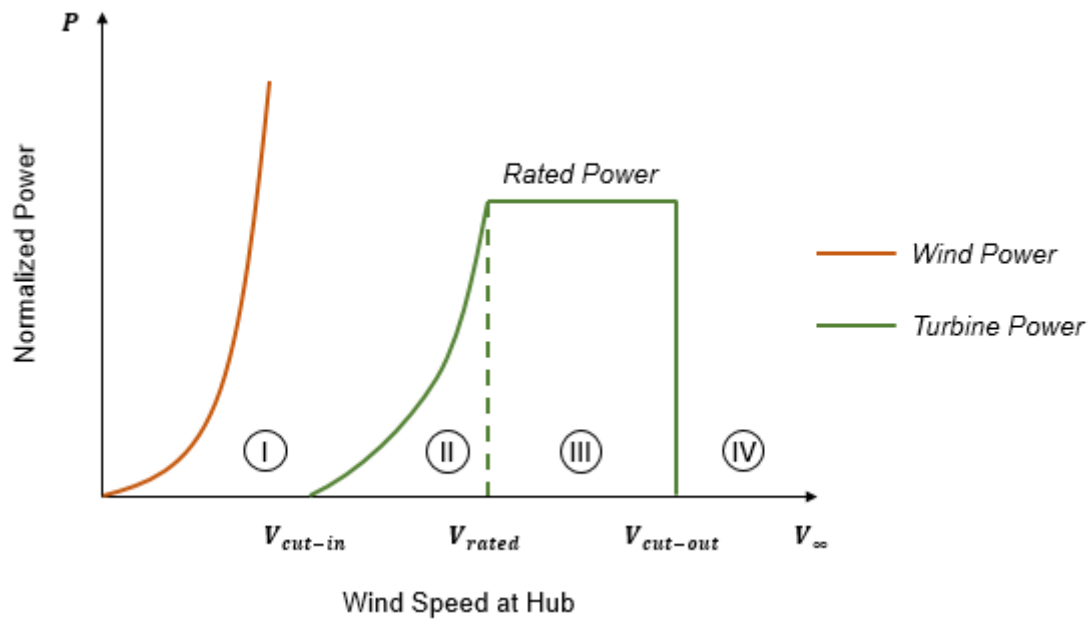
$$C_{p\text{ teórico}} = \frac{16}{27} \cong 0,593 \quad (2.5)$$

O valor de  $C_{p\text{ teórico}}$  é associado a uma turbina eólica ideal, com um número infinito de pás e sem perdas. Para além disso, a teoria de *Betz* assume várias condições, entre elas [19]:

- O fluido é considerado homogéneo e incompressível;
- Não existe resistência aerodinâmica;
- Não existe momento transmitido ao escoamento que passa pela turbina.

No entanto, na realidade as turbinas eólicas são incapazes de atingir esse valor, pois as condições reais são bastante diferentes das ideais.

As turbinas eólicas apresentam uma curva de potência característica que pode ser visualizada na Figura 2.6. Além disso, é possível visualizar também a curva do potencial eólico, cuja expressão está representada em (2.2).



**Figura 2.6 – Curva do potencial eólico e curva característica de uma turbina eólica. Adaptado de [20].**

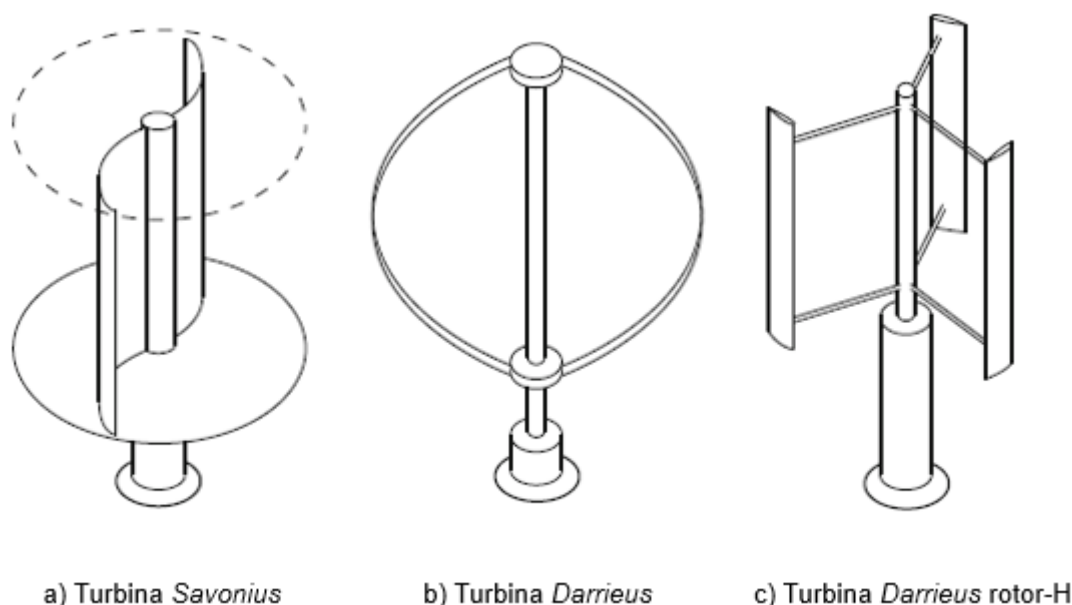
Como mostra a Figura 2.6, a curva de potência característica de uma turbina eólica divide-se em quatro fases. Na fase I, a velocidade do vento não é elevada o suficiente para que a turbina consiga produzir energia. A velocidade de entrada,  $V_{cut-in}$ , é a velocidade mínima do vento, presente na fase II, para que a turbina comece a introduzir eletricidade na rede. Nesta fase, teoricamente, de acordo com a expressão (2.3), a produção de energia aumenta com o cubo da velocidade do vento até atingir a velocidade nominal,  $V_{rated}$ . A velocidade nominal, na

fase III, corresponde à velocidade do vento a partir da qual a potência da turbina é limitada, por controlo aerodinâmico ao nível das pás e a potência nominal, *Rated Power*, é constante. A transição da fase III para a fase IV, acontece quando se atinge a velocidade de saída,  $V_{cut-out}$ , e corresponde à velocidade máxima do vento que a turbina pode operar antes de se interromper a operação de produção de energia e salvaguardar a sua integridade física, face à elevada velocidade do vento [19, 20].

## 2.4 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

As TEEV distinguem-se em duas categorias, de acordo com o tipo de força motriz: as turbinas de resistência (*drag*) e as turbinas de sustentação (*lift*). Numa turbina de resistência, a força motriz é a resistência aerodinâmica, pelo que as suas pás, teoricamente, movem-se com uma velocidade angular inferior à velocidade do vento e, por isso,  $TSR < 1$ . Contrariamente, funcionam as turbinas de sustentação, cuja força motriz corresponde à sustentação aerodinâmica e, portanto,  $TSR > 1$  [13, 19].

Um exemplo de uma turbina de resistência é a TEEV *Savonius*, representada na Figura 2.7-a). As pás da turbina possuem a forma de um “S” e o seu modo de funcionamento resulta das diferenças de força de arrasto entre as duas superfícies côncava e convexa da pá, que originam um momento de força e permite a rotação da turbina [21].



**Figura 2.7 – Diferentes tipos de turbinas eólicas de eixo vertical: a) Turbinas *Savonius*; b) Turbina *Darrieus*; c) Turbina *Darrieus* rotor-H. Adaptado de [19].**

As TEEV *Darrieus* são turbinas de sustentação e, tipicamente, consistem em duas ou mais pás ligadas a um eixo vertical rotativo. Devido à rotação das pás e à incidência do vento sobre as mesmas, é criada uma força de sustentação superior à força de arrasto. Existem dois

conceitos diferentes de TEEV *Darrieus*. Um deles apresentados na Figura 2.7-b), onde as pás da turbina possuem uma curvatura que permite uma maior resistência à força centrífuga. E o outro apresentado na Figura 2.7-c), onde as pás da turbina são retas, denominada turbina *Darrieus* de pás retas, *giromill* ou ainda rotor-H. Existe ainda uma variação da turbina *Darrieus* rotor-H, designada por *cycloturbine*, e possui um mecanismo que possibilita a rotação das pás segundo o seu próprio eixo, paralelo ao eixo de rotação da turbina e, assim, proporciona às pás um certo ângulo de inclinação para além do ângulo de ataque [22].

Embora as turbinas de resistência necessitem de uma menor velocidade de vento para entrarem em funcionamento comparativamente às turbinas de sustentação, como mostra a Figura 2.5 – através dos valores típicos de *TSR* para cada tipo de turbina – apresentam, no entanto, maiores perdas quando se regista uma maior velocidade de vento, tornando-se menos eficientes [13].

Neste trabalho é apenas estudado a turbina *Darrieus* rotor-H. Apesar do conceito apresentado na Figura 2.7-c), em que o eixo de rotação da turbina se encontra na vertical, é possível abordar a mesma turbina com o eixo de rotação na horizontal, não deixando, por isso, de pertencer aos modelos de turbinas eólicas de eixo vertical.

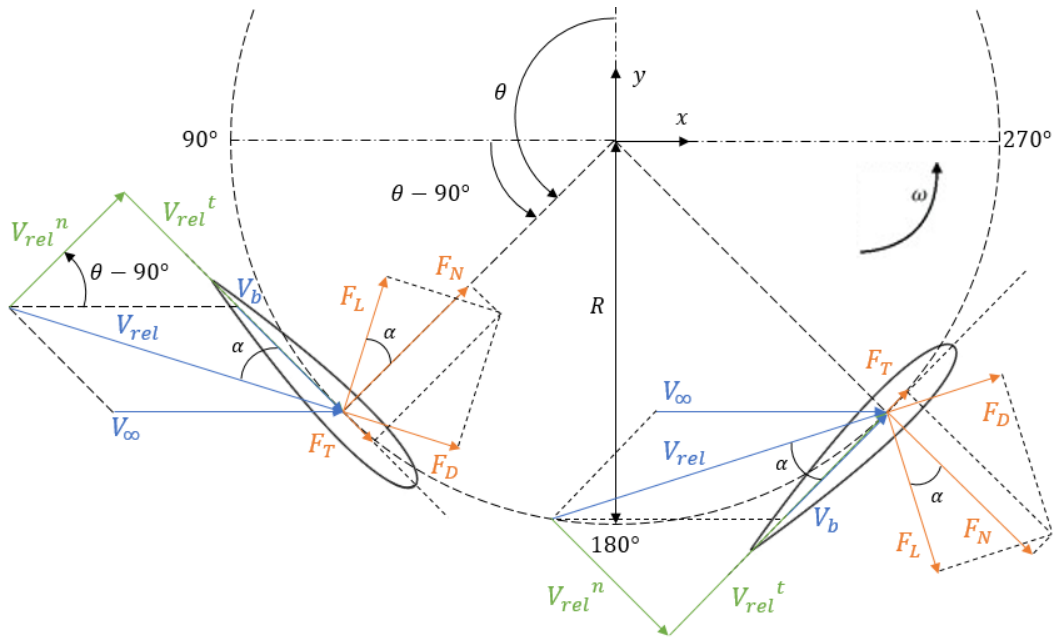
## 2.5 Fundamentos Teóricos de uma Turbina *Darrieus* Rotor-H

De modo a compreender o comportamento aerodinâmico de uma turbina *Darrieus* rotor-H é importante identificar as componentes das velocidades e das forças envolvidas nas pás. Na Figura 2.8 estão presentes os vetores das velocidades e das forças aplicadas numa das pás da turbina *Darrieus* rotor-H. De salientar, que a decomposição das componentes das forças e das velocidades estão de acordo com a rotação da pá no sentido anti-horário (sentido positivo), com a direção e sentido do escoamento e com o perfil simétrico da pá. De notar que o ângulo  $\theta = 0^\circ$  coincide com o eixo positivo das ordenadas (eixo  $y$ ). As considerações que são feitas para a representação destas componentes são mencionadas ao longo deste subcapítulo.

Através da Figura 2.8, pode-se observar também que nas pás da turbina, de raio  $R$ , incide uma determinada velocidade de vento,  $V_\infty$ . A turbina quando se encontra em rotação com uma velocidade angular,  $\omega$ , as pás possuem uma velocidade,  $V_b$ , que é tangencial ao seu movimento de rotação e é determinada pelo seguinte modo:

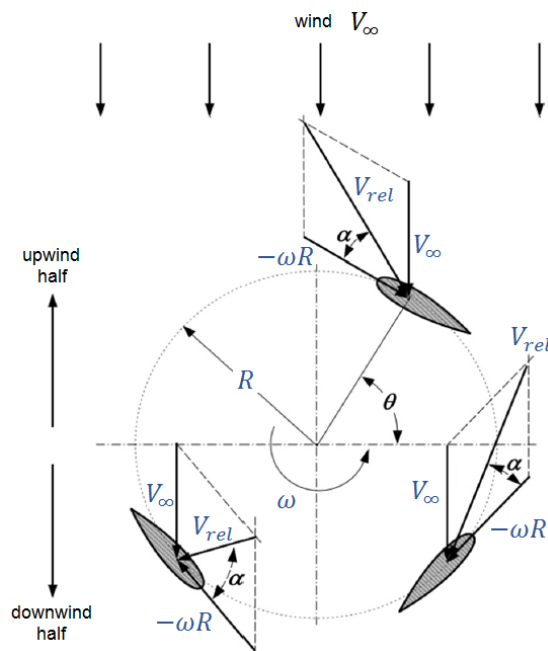
$$V_b = \omega R \quad (2.6)$$





**Figura 2.8 – Distribuição dos vetores de velocidade e de força aplicados numa das pás da turbina Darrieus rotor-H.**

O movimento de rotação da turbina, faz com que as pás estejam sujeitas a uma velocidade de vento relativa a esse movimento de rotação, que é representada pelo vetor,  $V_{rel}$ , e advém da resultante entre a velocidade da pá e a velocidade do escoamento não perturbado, como pode ser visto na Figura 2.8. Este vetor varia em intensidade, direção e sentido consoante a posição das pás da turbina, ou seja, consoante o seu ângulo de azimute,  $\theta$ , que está representado na Figura 2.9. Do mesmo modo, como se prova mais adiante, o ângulo de ataque,  $\alpha$ , entre essa velocidade relativa e a velocidade da pá, também varia em função de  $\theta$ .



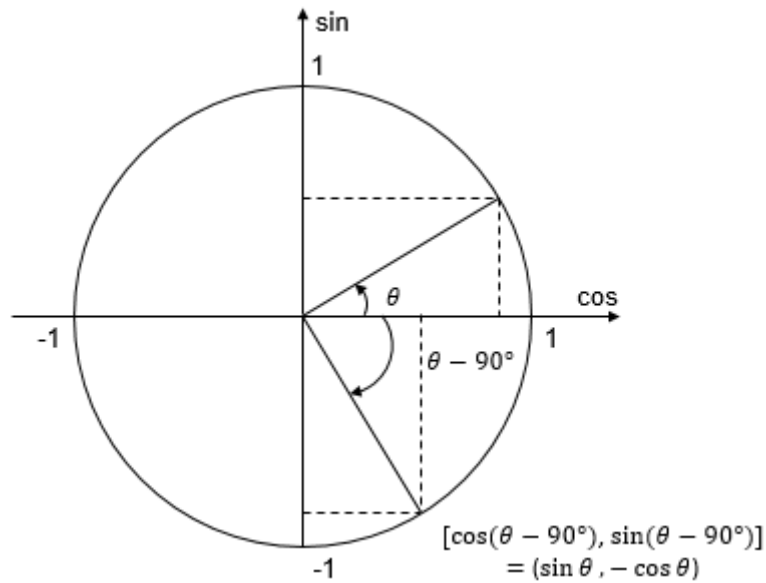
**Figura 2.9 – Representação dos vetores de velocidade para diferentes ângulos de azimute,  $\theta$ . Adaptado de [23].**

Ao observar novamente a Figura 2.8, a velocidade relativa,  $V_{rel}$ , pode ser decomposta em duas componentes: uma componente normal,  $V_{rel}^n$ , positiva na direção ao interior da turbina e uma componente tangencial,  $V_{rel}^t$ , positiva no sentido do bordo de fuga para o bordo de ataque da pá (representadas a verde). Cada componente pode ser calculada do seguinte modo:

$$V_{rel}^n = V_{\infty} \cos(\theta - 90^\circ) \quad (2.7)$$

$$V_{rel}^t = \omega R + V_{\infty} \sin(\theta - 90^\circ) \quad (2.8)$$

Para prosseguir o cálculo das componentes da velocidade relativa é necessário representar o círculo trigonométrico, apresentado na Figura 2.10, de modo a simplificar o ângulo  $(\theta - 90^\circ)$  e determinar as respectivas correspondências.



**Figura 2.10 – Círculo trigonométrico com a representação do ângulo  $(\theta - 90^\circ)$ .**

Concluindo, as componentes normal e tangencial da velocidade relativa são:

$$V_{rel}^n = V_{\infty} \sin \theta \quad (2.9)$$

$$V_{rel}^t = \omega R - V_{\infty} \cos \theta \quad (2.10)$$

De notar que a componente normal da velocidade relativa, expressão (2.9), não depende das características da turbina, isto é, não depende do raio nem da sua velocidade angular, contrariamente, à componente tangencial da velocidade relativa.

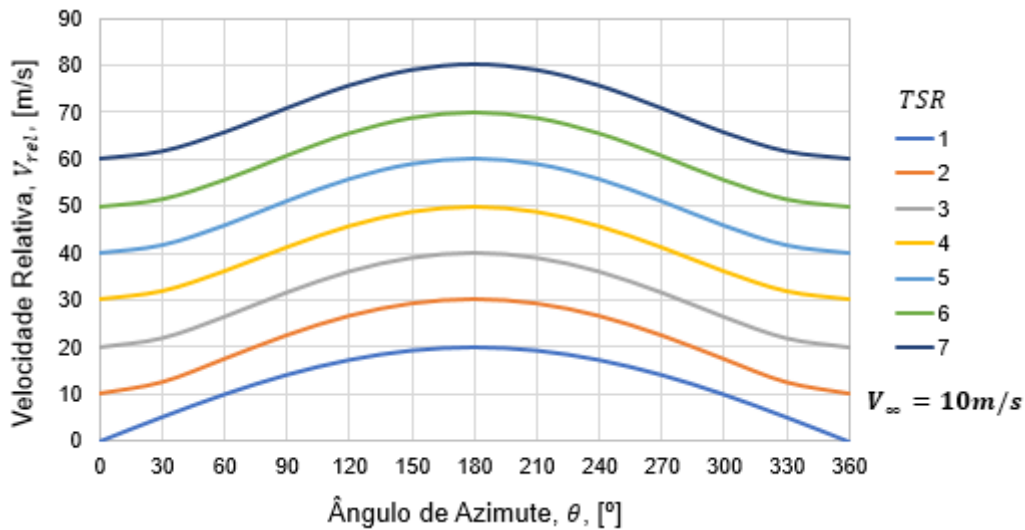
Assim, a intensidade da velocidade do vento relativa à posição da pá é dada pela seguinte equação:

$$V_{rel} = \sqrt{(V_{rel}^n)^2 + (V_{rel}^t)^2} \quad (2.11)$$

Substituindo ambas as componentes da equação (2.11) pelas equações (2.9), (2.10) e, posteriormente, pela equação (2.4), obtém-se:

$$\begin{aligned} V_{rel} &= \sqrt{(V_{\infty} \sin \theta)^2 + (\omega R - V_{\infty} \cos \theta)^2} = \sqrt{V_{\infty}^2 (\sin \theta)^2 + (TSR V_{\infty} - V_{\infty} \cos \theta)^2} \\ \Leftrightarrow V_{rel} &= \sqrt{V_{\infty}^2 (\sin \theta)^2 + (TSR^2 V_{\infty}^2 - 2 V_{\infty}^2 TSR \cos \theta + V_{\infty}^2 (\cos \theta)^2)} \\ \Leftrightarrow V_{rel} &= V_{\infty} \sqrt{(TSR^2 - 2 TSR \cos \theta + 1)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Na Figura 2.11 é possível perceber a evolução da velocidade relativa,  $V_{rel}$ , em função do ângulo de azimute,  $\theta$ , para diferentes valores de  $TSR$ , considerando uma velocidade de vento,  $V_{\infty} = 10 \text{ m/s}$ .



**Figura 2.11 – Variação da velocidade relativa,  $V_{rel}$ , em função do ângulo de azimute,  $\theta$ .**

Perante a Figura 2.11 e tendo em conta as condições da Figura 2.8, observa-se que a velocidade do vento relativa à posição da pá é máxima quando a mesma está na posição  $\theta = 180^\circ$ . Esta posição corresponde à situação em que a pá tem o sentido e direção igual à velocidade do vento. Por outro lado, é mínima quando se encontra em  $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 360^\circ$  (mesma posição), pois apesar de a pá ter a mesma direção que a velocidade do vento, têm sentidos opostos. Assim, a velocidade relativa máxima e mínima são dadas pelas seguintes equações, respetivamente:

$$V_{rel \max} = V_{\infty} \sqrt{(TSR^2 + 2 TSR + 1)} = V_{\infty} (TSR + 1) \quad (2.13)$$

$$V_{rel\ min} = V_{\infty} \sqrt{(TSR^2 - 2TSR + 1)} = V_{\infty}(TSR - 1) \quad (2.14)$$

Dada a equação da velocidade relativa, (2.12), é possível obter o número de *Reynolds* local,  $R_e$  para a turbina *Darrieus* rotor-H:

$$R_e = \frac{V_{rel}c}{\nu} = \frac{V_{\infty} \sqrt{TSR^2 - 2TSR \cos \theta + 1}}{\nu} c \quad (2.15)$$

onde  $\nu$  representa a viscosidade cinemática do ar e  $c$  o comprimento da corda da pá [22].

Ao observar novamente a Figura 2.8, é possível obter a relação entre o ângulo de ataque,  $\alpha$ , e as componentes normal e tangencial da velocidade relativa:

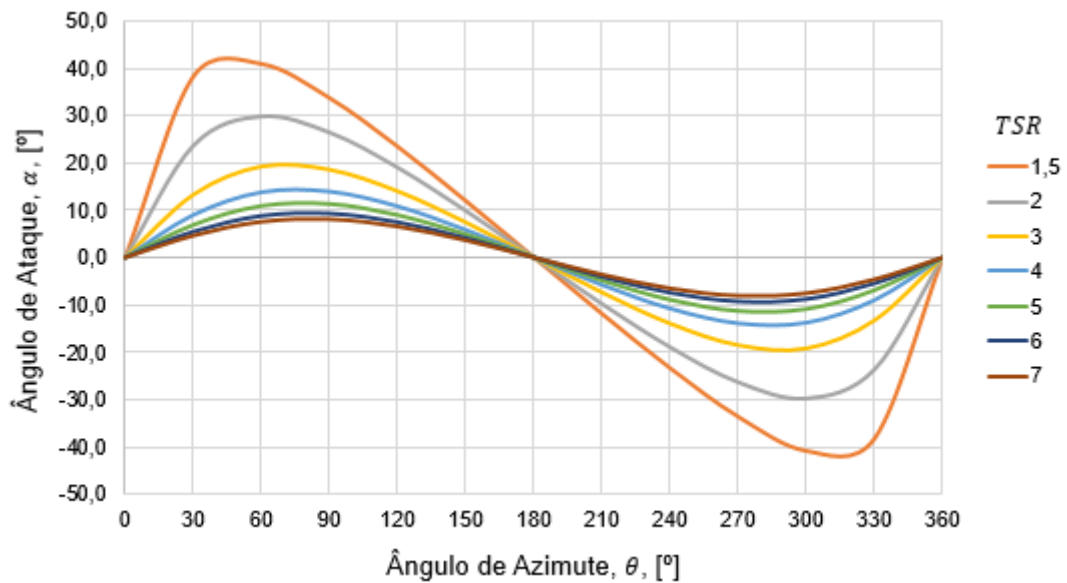
$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_{rel}^n}{V_{rel}^t} \right) \quad (2.16)$$

Substituindo a equação (2.16) pelas equações apresentadas em (2.9) e (2.10), resulta:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\infty} \sin \theta}{\omega R - V_{\infty} \cos \theta} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\frac{\omega R}{V_{\infty}} - \cos \theta} \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{TSR - \cos \theta} \right) \quad (2.17)$$

Como referido anteriormente, conclui-se então que o ângulo de ataque depende da posição das pás, ou seja, do ângulo de azimute,  $\theta$ , mas também do *TSR*. A Figura 2.12 mostra a variação de  $\alpha$  ao longo de  $\theta$  para diferentes valores de *TSR*.



**Figura 2.12 – Variação do ângulo de ataque,  $\alpha$ , em função do ângulo de azimute,  $\theta$ , para diferentes valores de *TSR*.**

Através da Figura 2.12, constata-se que quanto menor for o  $TSR$  maior é a variação de  $\alpha$  ao longo de  $\theta$ . Observe-se que a partir de  $TSR > 3$ ,  $\alpha_{m\acute{a}x} < 20^\circ$ , o que torna as perdas nas pás menos significativas [19]. Nas posições  $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 360^\circ$  e  $\theta = 180^\circ$ , o ângulo de ataque é zero, pois corresponde às situações em que a pá da turbina está alinhada com a direção da velocidade do vento.

Relativamente ao comportamento das forças aplicadas numa das pás da turbina, observa-se novamente a partir da Figura 2.8, que a força aerodinâmica de sustentação,  $F_L$ , é superior à força aerodinâmica de arrasto,  $F_D$ , (a força motriz da turbina *Darrieus* é a sustentação aerodinâmica). De notar que  $F_L$  tem a direção perpendicular à direção da velocidade relativa e,  $F_D$  a mesma direção e sentido da velocidade relativa. As forças aerodinâmicas de sustentação e de arrasto podem ser definidas, respetivamente, por:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho c L |V_{rel}|^2 \quad (2.19)$$

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho c L |V_{rel}|^2 \quad (2.20)$$

onde  $C_L$  e  $C_D$  são os coeficientes de sustentação e de arrasto aerodinâmicos, respetivamente,  $c$  é o comprimento da corda da pá e  $L$  é o comprimento da pá [22, 24].

A partir da Figura 2.8, os vetores da força na direção normal,  $F_N$ , e tangencial,  $F_T$ , são representados segundo as equações (2.21) e (2.22), respetivamente [24].

$$\vec{F}_N = \vec{F}_L \cos \alpha + \vec{F}_D \sin \alpha \quad (2.21)$$

$$\vec{F}_T = \vec{F}_L \sin \alpha + \vec{F}_D \cos \alpha \quad (2.22)$$

A força tangencial média aplicada numa pá pode ser expressa por [15, 22]:

$$\overline{F_T} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad (2.23)$$

O binário médio obtido no veio da turbina é dado por:

$$\bar{B} = N \overline{F_T} R \quad (2.24)$$

onde  $N$  corresponde ao número de pás da turbina [15, 22].

Por sua vez, a potência média da turbina é dada pela seguinte expressão [15, 22]:

$$\bar{P}_{turbina} = \bar{B} \omega \quad (2.25)$$

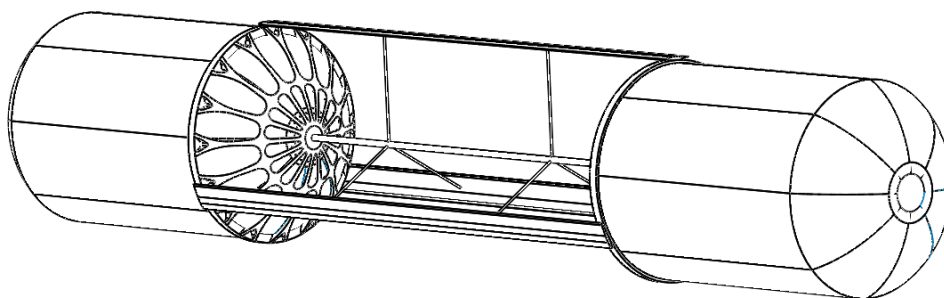


### 3 PARÂMETROS DE FUNCIONAMENTO DA TURBINA *DARRIEUS* ROTOR-H

#### 3.1 Apresentação do Novo Modelo da Plataforma Aérea

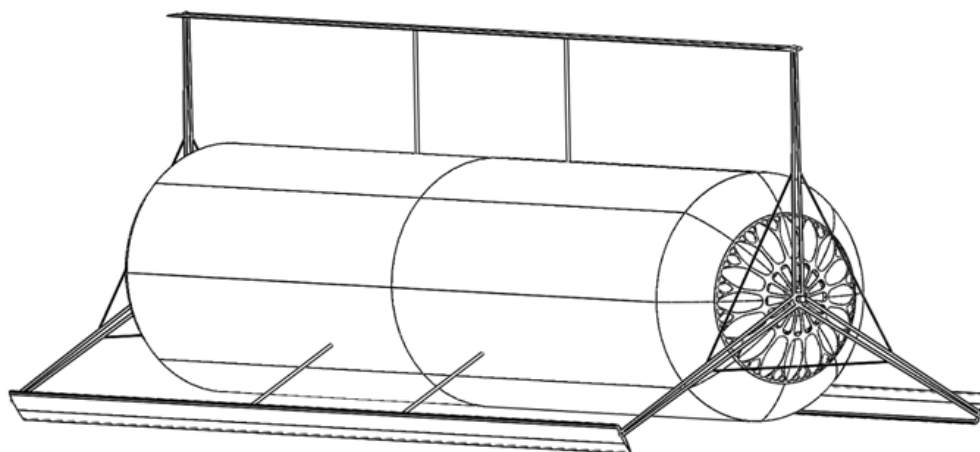
Como referido anteriormente, o projeto que é proposto para a realização desta dissertação consiste na alteração do modelo e no processo de produção de energia da antiga plataforma aérea. Numa primeira fase de estudo, o novo modelo para a plataforma aérea passa a ser constituído por um ou mais balões cilíndricos e uma turbina *Darrieus* rotor-H. A função de cada balão é garantir alguma flutuabilidade à plataforma aérea, pois a massa volumica do hélio é inferior à do ar. A função da turbina é converter energia eólica em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica.

De modo a implementar a turbina *Darrieus* rotor-H no novo modelo são analisadas, numa primeira fase de estudo, duas famílias de configurações. A família de configurações A, cujo efeito *Magnus* em cada balão pode-se considerar independente do funcionamento da turbina, ou seja, o escoamento que incide no balão não é perturbado pela ação da turbina, garantindo alguma liberdade a ambos e permitindo a criação da força de sustentação tanto no balão como na turbina. Na Figura 3.1 está representado um possível exemplo esquemático desta família de configurações.



**Figura 3.1 – Representação esquemática da família de configurações A.**

Em relação à família de configurações B, numa primeira fase de estudo, pode-se considerar que o efeito *Magnus* no balão é muito influenciado pelo funcionamento da turbina. Ou seja, o escoamento incide, maioritariamente, nas pás da turbina e, deste modo, a força aerodinâmica de sustentação é criada, principalmente, devido à rotação das pás. Apesar do balão se encontrar em rotação, o escoamento que sobre ele incide é perturbado pela ação da turbina. Na Figura 3.2 está representado um possível exemplo esquemático desta família de configurações.



**Figura 3.2 – Representação esquemática da família de configurações B.**

As duas figuras apresentadas acima têm apenas uma função esquemática, ou seja, não têm em conta critérios estruturais, não é realizada uma análise aos pontos de fixação, nem apresentam dimensões, criteriosamente, definidas. Têm como objetivo facilitar a compreensão dos conceitos que as duas famílias de configurações representam, fazer notar a diferença do diâmetro da turbina, a alteração do posicionamento do(s) balão(ões) e apresentar as duas possibilidades que a *Omnidea* pretende estudar a médio prazo. De notar, que tanto o diâmetro como o posicionamento da turbina, em cada família de configurações, podem ser sujeitos a alterações.

Após a apresentação das duas famílias de configurações, pretende-se analisar um caso específico. Durante os ensaios experimentais da antiga plataforma aérea que a equipa da *Omnidea* realizou na base da OTA em Alenquer, registou-se que a potência que o motor consome ao impor ao balão uma velocidade angular de 50RPM é cerca de 1kW. Por outro lado, registou-se também que a uma velocidade angular de 25RPM o motor consome 0,3kW.

De acordo com estes dados, pretende-se analisar as dimensões gerais da turbina *Darrieus*, nomeadamente, o comprimento das pás versus o seu diâmetro, de modo a produzir 1kW e 0,3kW, consoante as respetivas velocidades de rotação. O objetivo desta análise é verificar se é possível garantir a sustentabilidade do projeto, uma vez que, desta feita, a potência necessária para impor o movimento de rotação ao balão é proveniente de energia renovável e não poluente. A potência mecânica da turbina eólica é dada pela equação (2.3), sendo que, o comprimento das pás é dado pela seguinte equação:

$$L = \frac{2P_{turbina}}{C_p D \rho V_{\infty}^3} \quad (3.1)$$

A análise é feita para vários diâmetros e para várias velocidades de vento, conforme apresentado na Tabela 3.1. Numa primeira iteração, admite-se também que a velocidade



angular da turbina é constante e igual à velocidade angular do balão, a massa volúmica do fluido (ar) corresponde a  $1,2 \text{ kg/m}^3$  e considera-se os dados da Figura 2.5.

**Tabela 3.1 – Condições iniciais para a análise deste caso específico.**

Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]	2	4	6	8	9	10				
Velocidade do Vento, $V_\infty$ , [m/s]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	

Como esta análise é feita para vários diâmetros e várias velocidades de vento, a turbina possui vários valores de  $TSR$ , e, conseqüentemente, vários valores de  $C_p$ . Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 são apresentados os valores de  $TSR$  para uma velocidade angular de 50RPM e 25RPM, respetivamente. De relembrar que o  $TSR$  é calculado pela equação (2.4).

**Tabela 3.2 – Valores de  $TSR$  de acordo com as condições iniciais (50RPM).**

$TSR$	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]					
	2	4	6	8	9	10
$V_\infty = 2$	<b>2,6</b>	<b>5,2</b>	7,9	10,5	11,8	13,1
$V_\infty = 4$	1,3	<b>2,6</b>	<b>3,9</b>	<b>5,2</b>	<b>5,9</b>	<b>6,5</b>
$V_\infty = 6$	0,9	<b>1,7</b>	<b>2,6</b>	<b>3,5</b>	<b>3,9</b>	<b>4,4</b>
$V_\infty = 8$	0,7	1,3	<b>2,0</b>	<b>2,6</b>	<b>2,9</b>	<b>3,3</b>
$V_\infty = 10$	0,5	1,0	<b>1,6</b>	<b>2,1</b>	<b>2,4</b>	<b>2,6</b>
$V_\infty = 12$	0,4	0,9	1,3	<b>1,7</b>	<b>2,0</b>	<b>2,2</b>
$V_\infty = 14$	0,4	0,7	1,1	<b>1,5</b>	<b>1,7</b>	<b>1,9</b>
$V_\infty = 16$	0,3	0,7	1,0	1,3	<b>1,5</b>	<b>1,6</b>
$V_\infty = 18$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,3	<b>1,5</b>

**Tabela 3.3 – Valores de  $TSR$  de acordo com as condições iniciais (25RPM).**

$TSR$	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]					
	2	4	6	8	9	10
$V_\infty = 2$	1,3	<b>2,6</b>	<b>3,9</b>	<b>5,2</b>	<b>5,9</b>	<b>6,5</b>
$V_\infty = 4$	0,7	1,3	<b>2,0</b>	<b>2,6</b>	<b>2,9</b>	<b>3,3</b>
$V_\infty = 6$	0,4	0,9	1,3	<b>1,7</b>	<b>2,0</b>	<b>2,2</b>
$V_\infty = 8$	0,3	0,7	1,0	1,3	<b>1,5</b>	<b>1,6</b>
$V_\infty = 10$	0,3	0,5	0,8	1,0	1,2	1,3
$V_\infty = 12$	0,2	0,4	0,7	0,9	1,0	1,1
$V_\infty = 14$	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9
$V_\infty = 16$	0,2	0,3	0,5	0,7	0,7	0,8
$V_\infty = 18$	0,1	0,3	0,4	0,6	0,7	0,7

Os valores que estão a negrito, em ambas as tabelas, correspondem ao intervalo de funcionamento da turbina *Darrieus*, como pode ser visto na Figura 2.5, cujo  $TSR$  varia tipicamente entre 1,5 e 7,5. Assim, conforme a mesma figura, é possível estimar os valores do coeficiente de potência,  $C_p$ , presentes na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5, para os valores de  $TSR$  que se apresentam a negrito.

**Tabela 3.4 – Coeficientes de potência de acordo com os valores da Tabela 3.2 (50RPM).**

$C_p$	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]					
	2	4	6	8	9	10
$V_\infty = 2$	0,06	<b>0,38</b>	-	-	-	-
$V_\infty = 4$	-	0,06	<b>0,41</b>	<b>0,38</b>	<b>0,30</b>	<b>0,22</b>
$V_\infty = 6$	-	0,02	0,06	<b>0,34</b>	<b>0,41</b>	<b>0,41</b>
$V_\infty = 8$	-	-	0,03	0,06	0,09	<b>0,15</b>
$V_\infty = 10$	-	-	0,01	0,03	0,06	0,06
$V_\infty = 12$	-	-	-	0,02	0,03	0,03
$V_\infty = 14$	-	-	-	0,01	0,02	0,03
$V_\infty = 16$	-	-	-	-	0,01	0,01
$V_\infty = 18$	-	-	-	-	-	0,01

**Tabela 3.5 – Coeficientes de potência de acordo com os valores da Tabela 3.3 (25RPM).**

$C_p$	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]					
	2	4	6	8	9	10
$V_\infty = 2$	-	0,06	<b>0,41</b>	<b>0,38</b>	<b>0,30</b>	<b>0,22</b>
$V_\infty = 4$	-	-	0,03	0,06	0,09	<b>0,15</b>
$V_\infty = 6$	-	-	-	0,02	0,03	<b>0,41</b>
$V_\infty = 8$	-	-	-	-	0,01	0,03
$V_\infty = 10$	-	-	-	-	-	0,01
$V_\infty = 12$	-	-	-	-	-	-
$V_\infty = 14$	-	-	-	-	-	-
$V_\infty = 16$	-	-	-	-	-	-
$V_\infty = 18$	-	-	-	-	-	-

Para esta análise considera-se que a turbina deve operar em condições tais que o seu coeficiente de potência tem de ser no mínimo 0,1 e, portanto, os valores a negrito correspondem a essa condição.

Terminado o cálculo dos coeficientes de potência de acordo com os respetivos valores de  $TSR$ , é possível determinar, através da equação (3.1), o comprimento das pás da turbina versus o seu diâmetro. Assim, na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7, surge essa informação, sabendo que a turbina tem de produzir no mínimo 1kW e 0,3kW, respetivamente.

**Tabela 3.6 – Valores do comprimento das pás versus o diâmetro da turbina.**

$P_{turbina} = 1kW; \omega = 50RPM$						
$L, [m]$	Diâmetro da Turbina, $D, [m]$					
	2	4	6	8	9	10
$V_{\infty} = 2$	-	137	-	-	-	-
$V_{\infty} = 4$	-	-	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>12</b>
$V_{\infty} = 6$	-	-	-	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
$V_{\infty} = 8$	-	-	-	-	-	<b>3</b>
$V_{\infty} = 10$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 12$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 14$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 16$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 18$	-	-	-	-	-	-

**Tabela 3.7 – Valores do comprimento das pás versus o diâmetro da turbina.**

$P_{turbina} = 0,3kW; \omega = 25RPM$						
$L, [m]$	Diâmetro da Turbina, $D, [m]$					
	2	4	6	8	9	10
$V_{\infty} = 2$	-	-	25	21	23	28
$V_{\infty} = 4$	-	-	-	-	-	<b>6</b>
$V_{\infty} = 6$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 8$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 10$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 12$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 14$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 16$	-	-	-	-	-	-
$V_{\infty} = 18$	-	-	-	-	-	-

O comprimento máximo de pás aceitável para este projeto é 16m, portanto, os valores que estão a negrito são, do ponto de vista geométrico, coerentes com a realidade do projeto. Posto isto, é possível retirar algumas conclusões. Primeiro, perante a Tabela 3.6, de modo a maximizar o aproveitamento energético da turbina e tendo em conta a sua velocidade angular e a potência mínima que a mesma tem de produzir, verifica-se que a turbina só pode operar para velocidades de vento compreendidas entre 4m/s e 8m/s (inclusive). No entanto, mesmo para essas velocidades de vento a turbina tem de ter umas determinadas dimensões, por exemplo, para uma velocidade de vento de 8m/s a turbina tem de ter um diâmetro mínimo de 10m. Ou seja, com o intuito de cumprir com o objetivo inicialmente traçado, a turbina tem de ter no mínimo um diâmetro de 10m e um comprimento de pás de 12m, de modo a ser capaz de produzir 1kW com uma velocidade angular de 50RPM e para velocidades de vento entre 4m/s a 8m/s.

Relativamente à segunda hipótese, em que a turbina possui uma velocidade angular de 25RPM e tem de produzir no mínimo 0,3kW, representada na Tabela 3.7, as condições de funcionamento são bastante limitadas, isto porque, a turbina só pode operar para uma velocidade de vento de 4m/s, sendo que o diâmetro mínimo corresponde a 10m e o comprimento de pás a 6m. Avaliando estes dados, chega-se à conclusão que a segunda hipótese não é viável.

Em suma, a energia gasta pelo motor para efetuar a rotação da plataforma aérea só é recuperada de uma fonte renovável e não poluente se a turbina possuir uma velocidade angular de pelo menos 50RPM, tiver um diâmetro de 10m, um comprimento de pás de 12m e se operar com velocidades de vento de 4m/s a 8 m/s.

Terminada esta análise seguem-se, nos próximos subcapítulos, alguns parâmetros importantes para o funcionamento da turbina. Estes são abordados com uma perspetiva de

maximizar a sua potência, tendo em conta as duas famílias de configurações apresentadas na Figura 3.1 e na Figura 3.2.

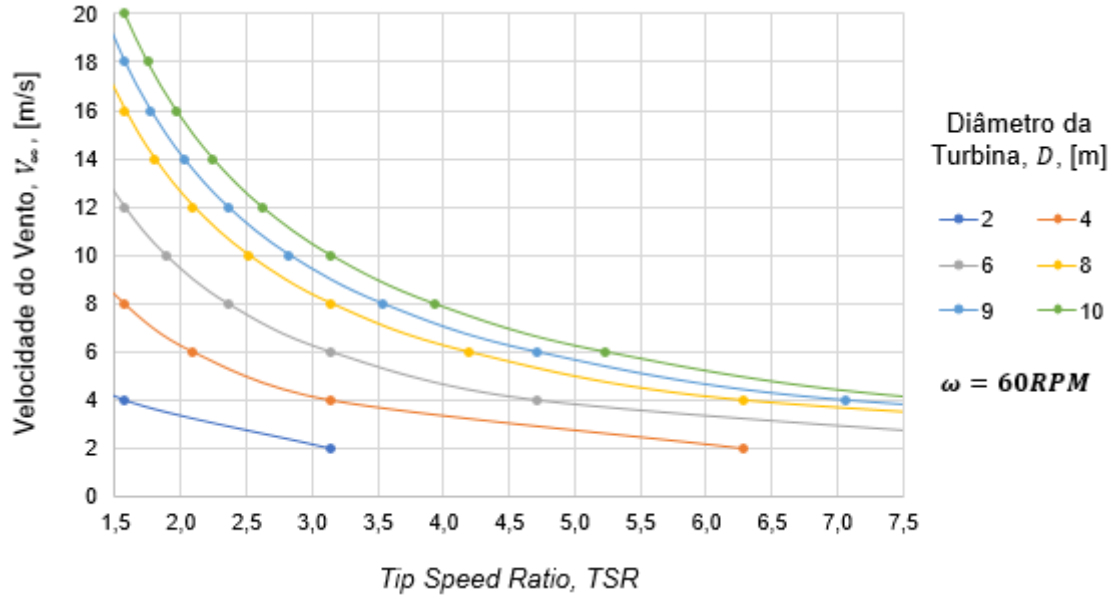
### 3.2 *Tip Speed Ratio, TSR*

O *TSR*, já abordado anteriormente nesta dissertação, pode ser calculado pela seguinte expressão [16, 17]:

$$TSR = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (3.2)$$

É um parâmetro importante no desenvolvimento de uma turbina eólica, pois está frequentemente associado à eficiência da turbina, nomeadamente, ao coeficiente de potência,  $C_p$ . Através deste parâmetro é possível identificar o regime de funcionamento da turbina, isto é, perceber qual a gama de velocidades de vento à qual a turbina pode operar segundo a velocidade das pás.

O *TSR* é um parâmetro inconstante, visto que, depende das condições do meio ambiente, mais propriamente da velocidade do vento, tornando o seu valor variável no tempo. Perante a Figura 3.3, é possível perceber qual a gama de velocidades de vento que corresponde ao regime de funcionamento da turbina. Constata-se que quanto maior é a velocidade do vento menor é o *TSR*. Contudo, registou-se anteriormente, que quanto menor for o *TSR*, maior é  $\alpha$  e a sua variação ao longo de  $\theta$ , aumentando as perdas na pá. Viu-se também que o intervalo de valores de *TSR* à qual a turbina *Darrieus* rotor-H está habilitada a funcionar corresponde a  $1,5 < TSR < 7,5$  e, por esse motivo, o gráfico da Figura 3.3 está limitado a esses valores. Para estes resultados considerou-se uma velocidade angular de  $60RPM \equiv 2\pi \text{ rad/s}$ , ou seja, considera-se que a turbina possui a mesma velocidade angular que a velocidade angular padrão da plataforma aérea.



**Figura 3.3 – Variação do TSR, de acordo com a velocidade do vento,  $V_{\infty}$ .**

Antes da iniciação do funcionamento da turbina, é essencial perceber a velocidade de vento mais frequente no local de operação da turbina e a sua variação ao longo do tempo – neste caso em alta altitude – pois esse fator é determinante para a análise eficiente das duas configurações e de outros parâmetros de funcionamento. Desse modo, a equipa de projeto da *Omnidea* verificou que a velocidade de vento mais frequente,  $V_{mf}$ , para o local de operação da turbina corresponde a 10 m/s.

Para determinar a distribuição probabilística do vento no local de funcionamento da turbina recorre-se à distribuição de *Weibull* que pode ser representada do seguinte modo [9]:

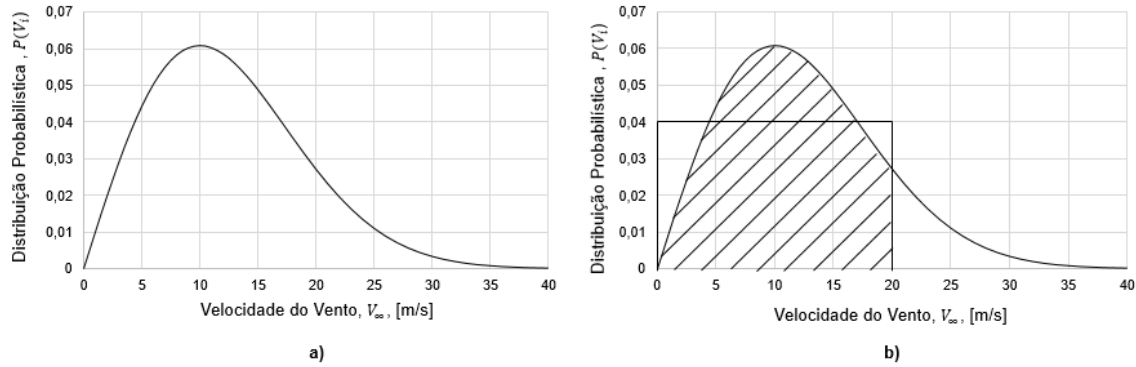
$$P(V_i) = \left(\frac{k_f}{C}\right) \left(\frac{V_i}{C}\right)^{(k_f-1)} \exp \left[ -\left(\frac{V_i}{C}\right)^{k_f} \right] \quad (3.3)$$

sendo que  $P(V_i)$  representa a probabilidade de ocorrer ao longo de um ano uma determinada velocidade de vento,  $V_i$ . O termo  $C$  corresponde ao fator de escala e  $k_f$  simboliza o fator de forma, normalmente escolhido entre 1 e 3, sendo que quanto menor for esse valor, maior é a distribuição de velocidades ao longo da velocidade média do vento. Consoante a gama de velocidades registadas no local de funcionamento da turbina, é escolhido  $k_f = 2$ .

De forma a determinar o fator de escala recorre-se à velocidade de vento mais frequente. Para isso, é necessário determinar a derivada da distribuição de *Weibull* em ordem a  $V_i$  e igualar a zero, pois corresponde à tangente do ponto máximo de inflexão [9]:

$$\frac{dP(V_i)}{dV_i} = 0 \Leftrightarrow V_{mf} = C(1 - 1/k_f)^{1/k_f} \quad (3.4)$$

Assim, obtém-se  $C = 10\sqrt{2}$ . De seguida, na Figura 3.4, é apresentada então a distribuição probabilística de *Weibull*, segundo as condições acima impostas para o local de funcionamento da turbina.



**Figura 3.4 – Distribuição probabilística do vento para o local de funcionamento da turbina.**

Apresentada a curva de distribuição de *Weibull*, na Figura 3.4-a), pode-se concluir que a probabilidade correspondente à velocidade de vento mais frequente,  $V_{mf} = 10\text{ m/s}$ , é 6%. Por outro lado, verifica-se também que a área do retângulo, na Figura 3.4-b), é aproximadamente igual à área a tracejado, logo pelo cálculo da área do retângulo ( $20 \times 0,04$ ) constata-se que 80% das velocidades de vento registadas no local de operação da turbina, num período equivalente a um ano, estão no intervalo de 0m/s a 20m/s.

Contudo, sabe-se que a velocidade de vento mais frequente não é a única que se deve considerar para este estudo, visto que, a potência da turbina é proporcional ao cubo da velocidade do vento ( $P_{turbina} \propto V_{\infty}^3$ ). Ou seja, é necessário que se determine a velocidade de vento que mais energia contribui, que se obtém multiplicando a potência da turbina, correspondente a essa velocidade, pela sua probabilidade de ocorrer. Uma vez encontrada a velocidade de vento que mais energia contribui, é desejável que esta seja aproximadamente igual à velocidade nominal da turbina [9].

Aliando a este estudo, é importante avaliar as condições estruturais para a operabilidade da turbina, pois estas estão dependentes da velocidade do vento. Através deste trabalho não se consegue estimar a velocidade do vento máxima que as duas configurações estão habilitadas a operar sem comprometer a estrutura do projeto, pelo que, apresenta-se apenas a curva probabilística do vento.

Posto isto, analisando a Figura 3.3, conclui-se que quanto menor for o diâmetro da turbina menor é o intervalo de velocidades de vento que a mesma consegue operar. Uma solução para contrariar este facto seria aumentar, se possível, a velocidade angular da turbina. Outro aspeto importante a retirar da Figura 3.3 é a relação entre a velocidade do vento e o *TSR* para este caso específico. Ou seja, tendo em conta o regime de funcionamento da turbina *Darrieus* ( $1,5 \leq \text{TSR} \leq 7,5$ ), a sua velocidade angular de 60RPM e observando a curva

probabilística de vento presente na Figura 3.4, verifica-se que o intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$  é onde se encontram no mínimo cerca de 70% das velocidades de vento registadas no local de operação da turbina. Para provar este facto, é calculado o integral da distribuição probabilística de *Weibull*, sendo que 20m/s é a velocidade máxima que, neste caso, a turbina pode operar e 6m/s a velocidade de vento mínima para um diâmetro de 10m.

$$\int_6^{20} \left[ \left( \frac{2}{10\sqrt{2}} \right) \left( \frac{V_i}{10\sqrt{2}} \right) \exp \left[ - \left( \frac{V_i}{10\sqrt{2}} \right)^2 \right] \right] dV_i = \frac{1}{100} \int_6^{20} \left[ V_i \exp \left[ - \left( \frac{V_i^2}{200} \right) \right] \right] dV_i \quad (3.5)$$

Substituindo na equação (3.5):  $u = -V_i^2/200$ ; então  $dV_i = -(100/V_i) du$ . Assim, a equação (3.5) pode ser simplificada por:

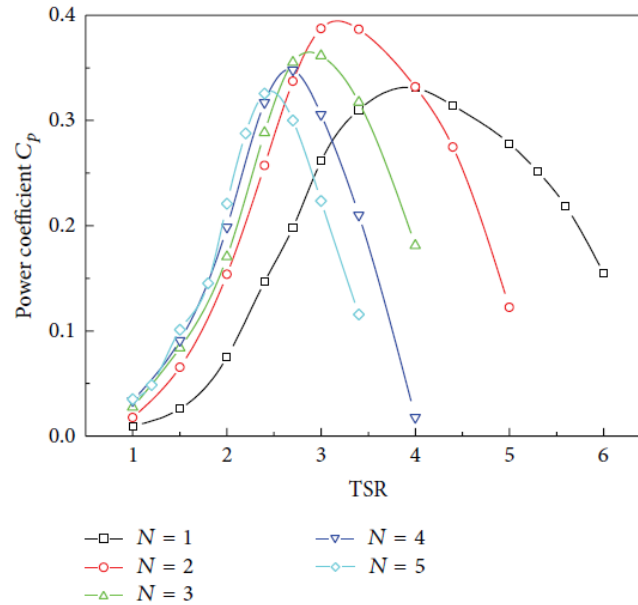
$$- \int_6^{20} e^u du \cong 0,7 \quad (3.6)$$

Concluindo, para se iniciar a escolha de alguns parâmetros de funcionamento da turbina considera-se como referência o intervalo de funcionamento  $1,5 \leq TSR \leq 5$ .

### 3.3 Número de Pás

O número de pás de uma turbina está relacionado com o balanço entre a eficiência aerodinâmica da turbina e a sua estabilidade estrutural [25]. É uma decisão importante para o funcionamento da mesma. Por vezes, a opção mais eficiente torna-se, do ponto de vista estrutural, inexequível. Portanto, é necessário conjugar estas duas vertentes.

Assim, perante a Figura 3.5, onde o coeficiente de potência da turbina varia de acordo com o número de pás e com o *TSR*, verifica-se que quanto menor for o número de pás da turbina, maior é o intervalo de valores de *TSR* que a turbina consegue operar. Por outro lado, à exceção de  $N = 1$ , quanto menor for o número de pás, maior é o coeficiente de potência máximo,  $C_{p \text{ máx}}$ , da turbina e maior é o valor do *TSR*, para o qual se atinge  $C_{p \text{ máx}}$ .



**Figura 3.5 – Variação do coeficiente de potência,  $C_p$ , em função do  $TSR$ , tendo em conta o diferente número de pás da turbina [25].**

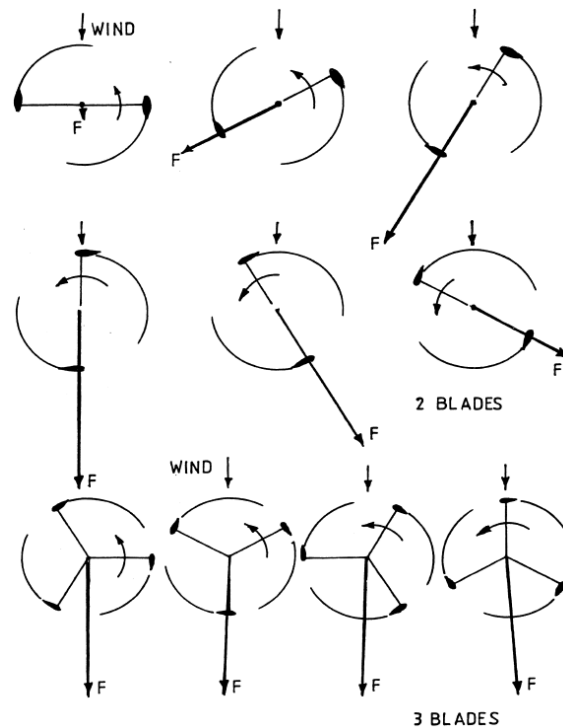
Ao observar a Figura 3.5, verifica-se que as evoluções das curvas referentes ao número de pás variam substancialmente ao longo dos vários valores de  $TSR$ , isto é, não se consegue obter um número ótimo de pás que satisfaça todo o regime de funcionamento da turbina, de modo a proporcionar sempre a máxima eficiência. No entanto, como se justificou anteriormente, considera-se o intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$ .

Nesse intervalo, é interessante olhar para as curvas  $N = 2$ ,  $N = 3$ ,  $N = 4$  e  $N = 5$  que constam na Figura 3.5, pois a opção  $N = 1$  só apresenta melhores resultados de  $C_p$  a partir de  $TSR > 4$ . As restantes 4 curvas têm um comportamento bastante semelhante entre  $1,5 \leq TSR \leq 2,3$ , aproximadamente, pelo que a variação do  $C_p$  entre elas é pouco significativa. No entanto, a partir de  $TSR > 2,3$  e  $TSR > 2,75$ , as curvas  $N = 5$  e  $N = 4$  sofrem uma grande diminuição do  $C_p$ , respetivamente, tornando estas opções menos viáveis. Posto isto, as curvas  $N = 2$  e  $N = 3$  são aquelas que contribuem para uma melhor eficiência média ao longo do intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 4$ .

Posto isto, resta apenas estudar essas duas curvas. Relativamente à opção  $N = 2$  verifica-se, geralmente, maiores problemas de ressonância da turbina, comparativamente a  $N = 3$ , pondo em risco a integridade física das pás. Isto porque, no caso de a turbina operar com  $N = 2$ , tanto a intensidade como a direção do somatório das forças aerodinâmicas variam, consideravelmente, ao longo da rotação da turbina, como pode ser visto Figura 3.6. Os efeitos das forças aerodinâmicas nas pás são mais significativos com  $N = 2$  do que com  $N = 3$ , pois os máximos dessas forças são atingidos duas vezes por volta, a cada  $180^\circ$ , aproximadamente em fase e na mesma direção em ambas as pás. No caso de operabilidade com  $N = 3$ , a



direção e a intensidade do somatório das forças aerodinâmicas são mais constantes ao longo da rotação, pois as pás estão distanciadas de  $120^\circ$  [19, 26].



**Figura 3.6 – Variação da direção e da intensidade do somatório das forças aerodinâmicas para  $N = 2$  e  $N = 3$  consoante a rotação da turbina [19, 26].**

Por outro lado, uma turbina consegue superar a velocidade de arranque com maior facilidade operando com  $N = 3$  em vez de  $N = 2$ , pois o binário é superior [25, 26]. Logo, aliando a vertente estrutural e energética a melhor opção é  $N = 3$ .

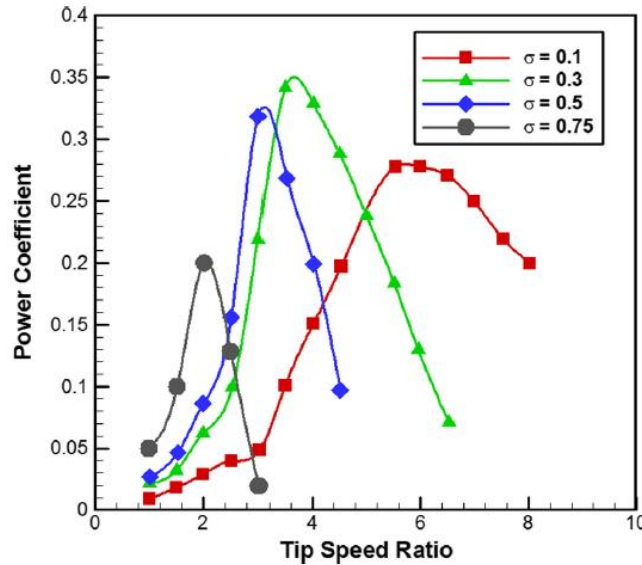
### 3.4 Solidez (*Solidity*) e Corda da Pá

A solidez,  $\sigma$ , (ou *solidity* da língua inglesa) é um parâmetro de funcionamento da turbina que depende do número de pás,  $N$ , do comprimento da corda da pá,  $c$ , e do raio da turbina,  $R$ . É representado pela seguinte expressão [27]:

$$\sigma = \frac{Nc}{R} \quad (3.7)$$

A solidez é um dos parâmetros de projeto de uma turbina eólica. É possível relacioná-lo com o coeficiente de potência,  $C_p$ , e com o *TSR*, sendo portanto, um parâmetro fundamental na eficiência da turbina.

A Figura 3.7, ajuda a perceber a variação do coeficiente de potência da turbina em função do  $TSR$  para diferentes valores de solidez. Quanto maior é a solidez, menor é o regime de funcionamento da turbina e menor é o valor do  $TSR$ , para um  $C_p$  máx.



**Figura 3.7 – Variação do coeficiente de potência,  $C_p$ , em função do  $TSR$ , para diferentes valores de solidez,  $\sigma$  [28].**

Tendo em conta o intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$ , de modo a concluir qual o valor de solidez mais favorável para obter uma melhor eficiência para o respetivo intervalo de valores é interessante analisar as curvas  $\sigma = 0,3$  e  $\sigma = 0,5$  que constam na Figura 3.7. As restantes curvas,  $\sigma = 0,1$  e  $\sigma = 0,75$  não são tão viáveis, pois a primeira só apresenta melhores resultados de  $C_p$  a partir de  $\lambda > 5$  e a segunda possui um regime de funcionamento demasiado curto ( $1,5 \leq TSR \leq 2,5$ ). Analisando então as duas curvas mais interessantes, chega-se à conclusão que a curva  $\sigma = 0,5$  apresenta melhores valores de  $C_p$  ao longo do intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 3,5$  comparativamente à curva  $\sigma = 0,3$ , logo corresponde a mais de metade do intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$ . Por outro lado, de acordo com a Figura 3.3 e com a Figura 3.4, é mais provável que ocorram, no local de operação da turbina, as velocidades de vento que constam no intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 3,5$  do que  $3,5 < TSR \leq 5$ . Para além disso, as velocidades de vento são superiores.

Inevitavelmente, quando se fala da solidez da turbina, o comprimento da corda da pá está subentendido. É possível determiná-lo através da seguinte equação:

$$c = \frac{\sigma_{ótimo}}{N} R \quad (3.8)$$

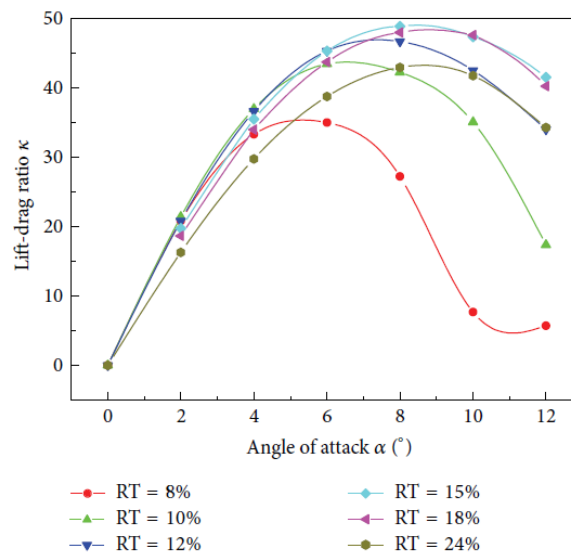
Sabe-se que um maior comprimento de corda da pá garante uma melhor resistência estrutural à turbina, no entanto, é importante aliar o rendimento da turbina e o peso das pás, pois podem não ser favoráveis tendo em conta certos requisitos de projeto.

### 3.5 Perfil das Pás

Normalmente, os perfis que são usados nas pás das turbinas *Darrieus* rotor-H são perfis da série NACA, compostos por 4 dígitos que identificam a geometria de cada perfil [13, 19].

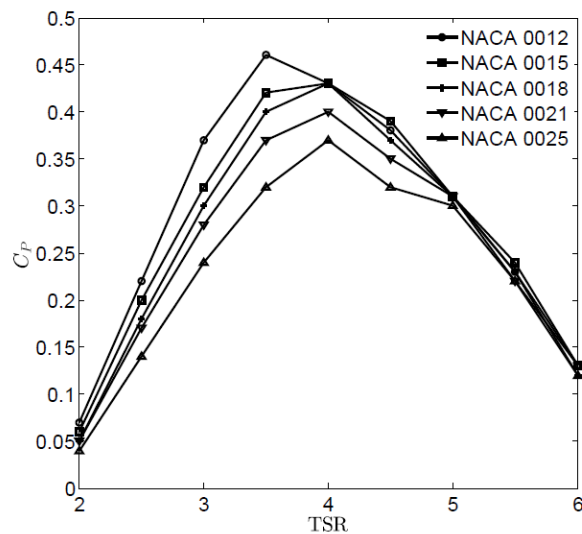
Dentro dos perfis da série NACA, existem os perfis simétricos e, numa primeira fase do projeto, é essa a gama de perfis que é estudada neste trabalho. Os dígitos “00” significam uma simetria das pás e os dígitos seguintes indicam a percentagem da espessura da pá em relação ao comprimento da corda, no sentido que quanto maior for esse dígito (percentagem) maior é a espessura e, por conseguinte, maior são as capacidades estruturais das pás.

A espessura da pá da corda é uma componente importante no desempenho aerodinâmico da turbina. Foram feitos estudos, como mostra a Figura 3.8, sobre a influência da espessura da pá relativamente ao rácio,  $\kappa$ , entre a força de sustentação e a força de arrasto. Os perfis de pás simétricos que têm espessuras relativas de 15% e de 18% (*RT*, *Relative Thickness*) obtêm um maior rácio,  $\kappa$ , a partir de um ângulo de ataque,  $\alpha > 8^\circ$ . Para baixos ângulos de ataque,  $\alpha < 5^\circ$ , o rácio  $\kappa$  varia muito pouco entre os respetivos perfis.



**Figura 3.8 – Variação do rácio  $\kappa$ , em função do ângulo de ataque,  $\alpha$ , para diferentes espessuras relativas, *RT* [25].**

No entanto, para além da relação com as forças aerodinâmicas, há também uma relação com a eficiência das TEEV. Na Figura 3.9 é possível verificar a variação do coeficiente de potência,  $C_p$ , de uma turbina eólica *Darrieus* rotor-H, em função do *TSR* para diferentes perfis NACA.



**Figura 3.9 – Variação do coeficiente de potência,  $C_p$ , em função do  $TSR$  para diferentes perfis NACA [14].**

Ao longo do intervalo  $2 \leq TSR \leq 4$ , observa-se que o perfil NACA 0012 é aquele que atinge um coeficiente de potência mais elevado. A partir de  $TSR > 4$ , os perfis NACA 0012, 0015 e 0018 acompanham a mesma tendência e apresentam valores semelhantes em relação ao coeficiente de potência. Os perfis NACA 0021 e 0025 para  $2 \leq TSR \leq 4$ , apresentam um coeficiente de potência mais baixo, tornando estas opções menos viáveis.

Apesar do perfil NACA 0012 ser aquele que apresenta um  $C_p$  mais elevado ao longo do intervalo  $2 \leq TSR \leq 4$ , a verdade é que a variação do  $C_p$  para os perfis NACA 0015 e 0018 é no máximo 0,05, aproximadamente. Como o perfil NACA 0015 apresenta uma melhor resistência estrutural comparativamente ao perfil NACA 0012 e aliando a informação da Figura 3.8 com a Figura 3.9 é considerado como primeira iteração o perfil NACA 0015. No entanto, é imprescindível realizar um estudo estrutural com o intuito de perceber o comportamento das tensões ao longo das pás para cada perfil NACA e avaliar a exequibilidade do projeto.

## 4 INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO NUMÉRICA

De modo a complementar o trabalho da presente dissertação, surgiu a oportunidade junto da empresa *Omnidea*, de estudar, numa primeira aproximação, o modelo genérico da plataforma aérea e as duas famílias de configurações A e B através da simulação numérica de fluidos, CFD (*Computacional Fluid Dynamics*).

O *OpenFOAM* (OF) é um programa CFD que está disponível para o sistema operativo *Linux*, como o *Ubuntu*, e para o sistema operativo *Windows* utilizando uma máquina virtual com o sistema operativo *Ubuntu* instalado. O OF foi o programa escolhido para realizar as simulações numéricas porque não tem qualquer custo para o utilizador, possui um código aberto, ou seja, o utilizador tem a liberdade para aceder, criar e modificar os códigos do programa, com a devida referência aos autores do código base. A maior parte da informação para aprender a trabalhar no OF encontra-se na internet, em fóruns, na plataforma CFD online e existem cursos de formação não gratuitos. O programa OF é totalmente escrito em C++.

As modelações numéricas que são mencionadas ao longo desta dissertação foram realizadas com o programa *OpenFOAM 4.1*, instalado no sistema operativo *Ubuntu 16.04 LTS*. O computador usado foi um *Intel Core i7 – 3630QM, 2,4GHz* com *6GB* de *RAM* e com capacidade para *750GB* de armazenamento de dados.

Posto isto, neste trabalho pretende-se simular quatro casos de estudo, entre os quais:

1. Escoamento em torno de um cilindro estacionário;
2. Escoamento em torno de um cilindro em rotação;
3. Escoamento em torno das pás de uma turbina *Darrieus* rotor-H;
4. Escoamento em torno das pás de uma turbina *Darrieus* rotor-H com um cilindro em rotação.

Os dois primeiros casos de estudo correspondem ao modelo genérico da plataforma aérea que a *Omnidea* já desenvolveu, nomeadamente, constituída unicamente pelo balão cilíndrico e, por essa razão, são denominados, posteriormente, por caso do cilindro. Os resultados obtidos permitem analisar o escoamento em torno do balão durante o tempo de operação da plataforma aérea, estimar as forças e os coeficientes aerodinâmicos para diferentes velocidades de vento e diferentes velocidades de rotação. Por outro lado, estes dois primeiros códigos servem também para validar o programa *OpenFOAM*. Os dois últimos casos simulam, numa primeira aproximação, as duas famílias de configurações A e B e são denominados, mais adiante, por caso da turbina. Permite, essencialmente, retirar conclusões em relação ao comportamento do escoamento em torno das pás e verificar a influência que a ação da turbina tem no efeito *Magnus* do balão.

## 4.1 Funcionamento do Programa *OpenFOAM*

O *OpenFOAM* divide-se estruturalmente, em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Em cada uma são realizadas ações importantes tendo em conta o objetivo do problema que se pretende simular. O OF não possui interface gráfico na fase de pré-processamento, pelo que todos os parâmetros iniciais referentes às simulações são definidos por um conjunto de ficheiros de texto, em formato *ascii*, onde é possível editar e/ou introduzir a informação necessária de cada caso de estudo. Esses ficheiros estão respetivamente inseridos e organizados nas três pastas principais que definem o problema: a pasta *0*, a pasta *constant* e a pasta *system*. Para além destas três, existe também a pasta *postProcessing* que surge após se ter iniciado a simulação e contém os resultados da simulação em todos os passos de tempo.

O OF dispõe de uma ferramenta denominada *blockMesh* que cria malhas através de curvas e blocos retangulares. A geometria é criada em linguagem C++ no ficheiro *blockMeshDict* e, como não tem interface gráfico, não é possível acompanhar graficamente a sua construção, pelo que só é recomendado para gerar malhas simples. Neste trabalho, a malha usada no caso do cilindro é editada no programa *Gmsh* e, posteriormente convertida para o OF onde é agrupada a sua informação em formato de texto. Para criar malhas mais complexas é necessário utilizar outros programas, por exemplo, neste trabalho utiliza-se o *Pointwise* para criar a malha da turbina *Darrieus* que, posteriormente, é também convertida em formato de texto para o OF.

A fase de pós-processamento pode ser feita diretamente na linha de comandos do terminal do *Ubuntu* ou utilizando o programa *ParaView*. Este programa permite visualizar, graficamente, o comportamento da solução em todos os passos de tempo e, a partir daí, extrair os resultados, imagens ou ficheiros e calcular uma série de parâmetros e variáveis.

## 4.2 Modelação Matemática e Métodos de Discretização

A modelação matemática é muito útil para descrever as simulações numéricas efetuadas por diversos programas CFD, incluindo o *OpenFoam*. Isto é, para que seja possível descrever o comportamento de um fluido sujeito a determinadas condições e aceder ao efeito por ele causado sobre as fronteiras que o limitam, é necessário conhecer em todo o domínio, a distribuição de um certo número de variáveis dependentes [5].

As equações de *Navier-Stokes* descrevem, matematicamente, a variação das propriedades do escoamento, como a pressão e a velocidade. Assim, existem duas leis capazes de definir os campos de pressão e de velocidade num dado escoamento:

- Lei de conservação da massa (equação de continuidade);
- Lei de conservação da quantidade de movimento (segunda lei de *Newton*).

A lei de conservação da massa é definida pela equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $\vec{V}$  é o vetor velocidade e  $\nabla$  é o operador *Nabla*. Para o caso de um fluido incompressível ( $\rho = c.^{te}$ ), como é o caso da presente dissertação, a equação (4.1) resulta na seguinte equação:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4.2)$$

O operador *Nabla*,  $\nabla$ , corresponde a um operador diferencial, que para o caso de um escoamento bidimensional pode ser representado do seguinte modo:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{x} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{y} \quad (4.3)$$

A lei de conservação da quantidade de movimento é definida pela seguinte equação:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} p + \vec{f}_c + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (4.4)$$

sendo que  $\vec{\nabla} p$  é o termo da pressão (não incluindo a pressão hidrostática),  $\vec{f}_c$  é o termo designado para a contribuição de todas as forças aplicadas no volume de controlo e  $\mu \nabla^2 \vec{V}$  é o termo da viscosidade, onde  $\nabla^2$  é o operador *Laplaciano* que pode ser expresso por:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4.5)$$

Num escoamento turbulento, cada partícula, além da velocidade no sentido do escoamento médio, possui um movimento de agitação, com velocidades transversais ao escoamento médio. Este escoamento assemelha-se a um conjunto de movimentos turbilhonares, constituídos por vórtices de várias dimensões e várias frequências, sobrepondo-se, dum modo aleatório, ao escoamento médio [29]. Por outro lado, o efeito difusivo viscoso, isto é, o efeito devido às tensões de corte de origem viscosa, o elevado número de *Reynolds* e a dissipação de energia são características típicas que também definem escoamentos turbulentos [29, 30].

Este efeito de turbulência pode ser descrito, matematicamente, pelas equações *RANS* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*):

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} \right] = -\nabla \bar{p} + \bar{f}_c + \mu \nabla^2 \bar{V} + \bar{\tau}_{Re} \quad (4.6)$$

onde  $\bar{\tau}_{Re}$  representa o termo do tensor de *Reynolds*. As tensões de *Reynolds* tratam-se de um mecanismo adicional de troca de quantidade de movimento e representam a ação que as flutuações turbulentas exercem sobre o escoamento médio [5, 31]. No entanto, a resolução matemática das equações *RANS* por parte do *OpenFOAM*, torna o processo bastante exigente a nível computacional, pelo que se recorre aos modelos de turbulência de modo a modelar o fenómeno acima descrito. Os modelos de turbulência usados neste trabalho são apresentados mais adiante quando se abordar cada caso de estudo.

Relativamente aos métodos de discretização, cuja função é transformar as equações diferenciais em equações algébricas equivalentes para as variáveis do problema, o OF utiliza o método dos volumes finitos (MVF) para efetuar esse processamento durante a simulação. O MVF divide o domínio de solução num número finito de volumes de controlo (VC) e são aplicadas as equações de conservação em cada um. O VC é um elemento da malha que passa a fazer parte no domínio da solução. No centro de cada VC existe um nodo computacional, onde são calculados os valores das variáveis, sendo que a partir desses valores é feita uma interpolação de modo a obter os valores das variáveis em cada superfície dos VC. Este método adapta-se a qualquer tipo de malha, mesmo a geometrias mais complexas, pois apenas interessa definir as fronteiras de cada VC, sendo independente do sistema de coordenadas [32].

### 4.3 Códigos Numéricos

Relativamente à modelação numérica, nesta dissertação, são utilizados dois códigos numéricos diferentes (*solvers*, na língua inglesa). Um código numérico ou um *solver* conduz a descrição de um problema a um formulário genérico que está contido na biblioteca do programa e calcula a sua solução. Ao introduzir-se os códigos numéricos na linha de comandos do terminal dá-se início à simulação.

Neste trabalho foram usados dois códigos numéricos:

- *pisoFoam*;
- *pimpleDyMFoam*.

O código numérico *pisoFoam* utiliza o algoritmo PISO (*Pressure-Implicit Split-Operator*) e permite a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* para escoamentos transitórios, incompressíveis, turbulentos e isotérmicos. A discretização é feita através do método dos volumes finitos. Este algoritmo é um procedimento iterativo para equações de acoplamento para a conservação da massa e da quantidade de movimento. Ou seja, durante o



processamento da solução, o algoritmo em questão resolve uma equação de pressão, de modo a reforçar a conservação da massa, com uma correção explícita para a velocidade satisfazer a conservação da quantidade de movimento. Este código numérico é utilizado no caso do cilindro. Embora, o escoamento de um dos casos de estudo seja estacionário, o algoritmo PISO permite determinar as variáveis do escoamento e convergir corretamente para o respetivo problema.

O código numérico *pimpleDyMFoam* utiliza o algoritmo PIMPLE (*Pressure-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) e resulta de uma combinação entre os algoritmos PISO e SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Permite a resolução numérica das equações de *Navier-Stokes* para escoamentos transitórios, incompressíveis, turbulentos e isotérmicos. A discretização também é feita através do método dos volumes finitos. Normalmente, este código numérico é aplicado a problemas que utilizam malhas móveis, nesse sentido, é utilizado no caso da turbina.

## 4.4 Esquemas Numéricos e Algoritmos de Resolução

Os esquemas numéricos de discretização e de interpolação utilizados nas simulações são apresentados neste subcapítulo. Os esquemas numéricos de discretização têm como função transformar as equações diferenciais do domínio contínuo num sistema de equações algébricas, à semelhança do que acontece para o método dos volumes finitos. Os esquemas de interpolação, tal como o nome indica, permite determinar um novo conjunto de dados desconhecidos a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos [31]. Com o auxílio do *OpenFOAM – User Guide 4.0, secção 4.4, 2016* é possível relacionar a informação e aprofundá-la com maior detalhe.

Na Tabela 4.1 são apresentados os esquemas de discretização e de interpolação que são utilizados nas simulações numéricas deste trabalho consoante os variados termos matemáticos.

Tabela 4.1 – Esquemas de discretização e de interpolação do OF utilizados nas simulações.

1ª Derivada Temporal, $\partial/\partial t$		
Discretização	Descrição do Esquema	
<i>Euler</i>	Primeira ordem, implícito, limitado	
<i>CrankNicolson</i>	Segunda ordem, implícito, limitado	
Gradiente (termo difusivo), $\nabla$		
Discretização	Interpolação	Descrição do Esquema
<i>Gauss</i>	<i>linear</i>	Segunda ordem, integração Gaussiana com interpolação linear
Divergente (termo convectivo), $\nabla \cdot$		
Discretização	Interpolação	Descrição do Esquema
<i>Gauss</i>	<i>limitedLinearV 1</i>	Primeira/segunda ordem, limitado
<i>Gauss</i>	<i>linear</i>	Segunda ordem, não limitado
<i>Gauss</i>	<i>upwind</i>	Primeira ordem, limitado
<i>Gauss</i>	<i>linearUpwind</i>	Segunda ordem, não limitado
Laplaciano, $\nabla^2$		
Discretização	Interpolação	Descrição do Esquema
<i>Gauss</i>	<i>linear</i>	Primeira ordem, limitado
Gradiente Normal à Superfície, $\nabla U$		
Discretização	Interpolação	Descrição do Esquema
<i>corrected</i>	<i>linear</i>	Não limitado, segunda ordem, conservativo

Após a apresentação dos esquemas numéricos de discretização e de interpolação é necessário definir os algoritmos que permitem resolver os sistemas de equações algébricas. Consiste num processo iterativo que tem em conta a solução inicial e prossegue até o resíduo atingir a precisão desejada [31]. Os algoritmos de resolução dividem-se em várias vertentes. A primeira é denominada de *linear-solver* e refere-se ao tipo de método de cruzamento de números para resolver uma equação matriz de cada uma das equações discretizadas, por exemplo, velocidade e pressão. De seguida são definidos o *smoother* e o pré-condicionador, este último permite uma convergência mais rápida da solução. Na Tabela 4.2 são apresentados os algoritmos de resolução e as características para cada vertente.

**Tabela 4.2 – Linear-solvers, smoother e pré-condicionador do OF utilizados nas simulações.**

<b>Linear-solver</b>	<b>Características</b>
PCG ( <i>Preconditioned Conjugate Gradient</i> )	Resolve matrizes simétricas
PBiCG ( <i>Preconditioned Bi-Conjugate Gradient</i> )	Resolve matrizes assimétricas
GAMG ( <i>Geometric-Algebraic Multi-Grid</i> )	Resolve matrizes assimétricas
<i>smooth solver</i>	Depende do <i>smoother</i> escolhido
<b>Smoother</b>	<b>Características</b>
<i>GaussSeidel</i>	Resolve matrizes assimétricas
<b>Pré-condicionador</b>	<b>Características</b>
DIC ( <i>Diagonal Incomplete-Cholesky</i> )	Resolve matrizes simétricas
DILU ( <i>Diagonal Incomplete-LU</i> )	Resolve matrizes assimétricas

## 4.5 Número de *Courant*

Existe um parâmetro importante a ter em conta nas simulações CFD que corresponde ao número de *Courant*,  $C_o$ , e é definido pela seguinte equação:

$$C_o = \frac{V_{\infty} \Delta t}{\Delta x} \quad (4.7)$$

sendo que  $\Delta t$  é o passo de tempo da simulação e  $\Delta x$  é o espaçamento entre cada célula da malha. Este parâmetro é um número adimensional, deve ser inferior a 1 e constante ao longo de todo o tempo de simulação, de maneira a garantir que os resultados convirjam para uma solução que seja o mais próximo possível da realidade.

Para que o número de Courant seja inferior a 1 é necessário que  $V_{\infty} \Delta t < \Delta x$ . Como neste projeto  $V_{\infty}$  é sempre superior a 1, então  $\Delta x$  é sempre superior a  $\Delta t$ . Ou seja, quando o utilizador está a construir a malha é preciso ter em atenção o espaçamento entre as células, pois quanto menor for esse espaçamento, menor é o passo de tempo e maior é o tempo de simulação.



## 5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DO CILINDRO

As simulações numéricas referentes ao caso do cilindro pretendem representar uma simulação computacional do projeto que a *Omnidea* já desenvolveu, nomeadamente, o modelo genérico da plataforma aérea constituída unicamente pelo balão cilíndrico. Assim, é possível analisar o comportamento do escoamento durante o tempo de operação e estimar as forças e os coeficientes aerodinâmicos para alguns regimes de funcionamento, contribuindo para a consolidação do projeto.

O caso do cilindro, conforme apresentado na Figura 5.1, divide-se em dois casos de estudo: um escoamento em torno de um cilindro estacionário e um escoamento em torno de um cilindro em rotação.

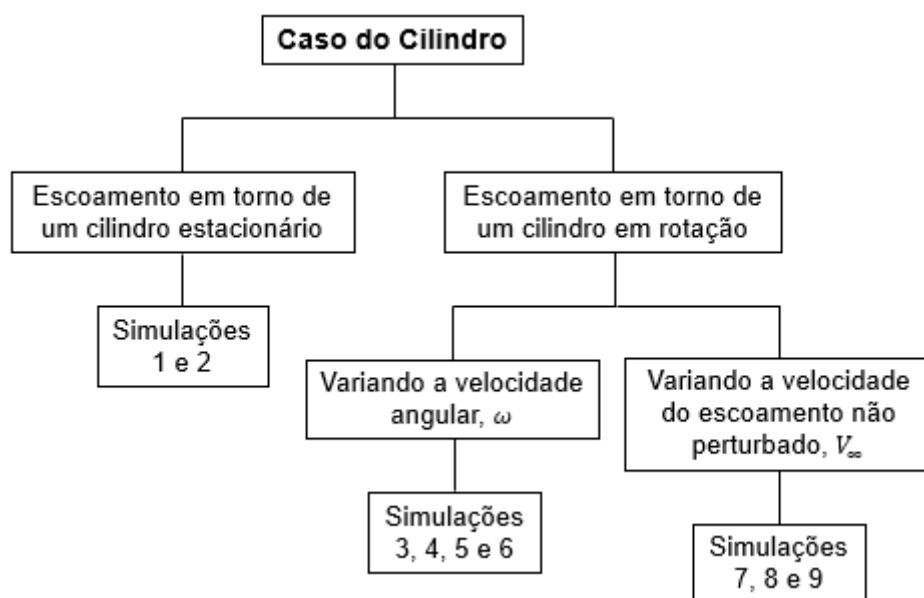


Figura 5.1 – Representação esquemática das simulações que se destinam a cada caso de estudo.

De seguida, apresenta-se na Tabela 5.1, a informação detalhada das características das simulações que correspondem ao caso do cilindro e que completam a informação da Figura 5.1.

As simulações relativas ao escoamento em torno do cilindro estacionário (simulações 1 e 2) correspondem a um determinado instante, durante as fases de descolagem e aterragem da plataforma aérea, em que a rotação do balão é nula e sobre ele incide uma determinada velocidade de vento. De notar que as fases de descolagem e de aterragem são realizadas a baixa altitude, perto do solo, logo a velocidade do vento é baixa, como apresentado na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 – Características das simulações para o caso do cilindro.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_{\infty}$ , [m/s]	Velocidade Angular do Balão, $\omega$		TSR	Número de Reynolds, $R_e$
		[rad/s]	[RPM]		
1	2	0	0	0	$5,3 \times 10^5$
2	3				$8 \times 10^5$
3	4	6,28	60	3	$1 \times 10^6$
4		5,24	50	2,5	
5		4,19	40	2	
6		3,14	30	1,5	
7	6,3	6,28	60	2	$1,7 \times 10^6$
8	8,4			1,5	$2,2 \times 10^6$
9	12,6			1	$3,4 \times 10^6$

Em relação ao caso do escoamento em torno do cilindro em rotação, corresponde quase à totalidade do tempo de operação da plataforma aérea em média e alta altitude. As simulações 3, 4, 5 e 6 são realizadas para um só número de *Reynolds*, fazendo variar a velocidade angular do balão, como pode ser visto na Tabela 5.1. Assim, é possível estudar para várias velocidades de rotação do balão, em sentido horário, as transições entre as fases de descolagem e de aterragem para a média altitude. Por sua vez, as simulações 7, 8 e 9 permitem estudar o tempo de operação da plataforma aérea em alta altitude, onde a velocidade angular do balão sofre poucas alterações e a velocidade do vento varia.

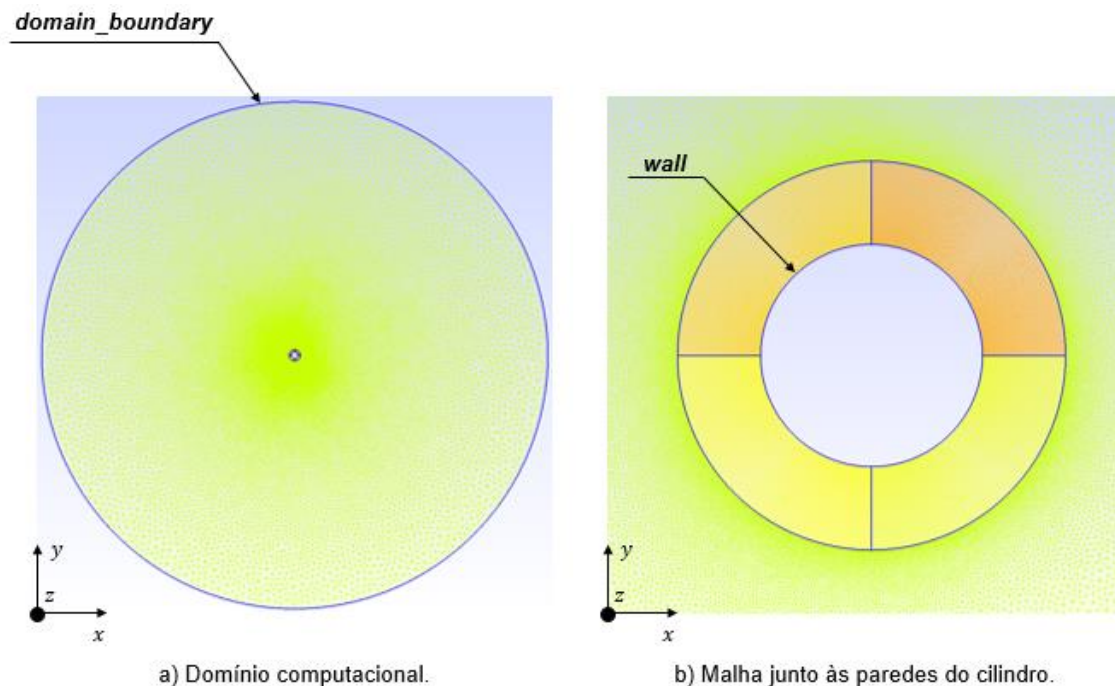
## 5.1 Geração da Malha e Limites dos Domínios

Após a introdução ao problema é necessário definir alguns parâmetros da simulação. Como ponto de partida, utiliza-se um código base, disponível na plataforma online *GitHub*, cujo autor está referenciado em [33] e, posteriormente, são feitas alterações de modo a simular o problema desejado.

Primeiramente, define-se as dimensões do cilindro e os aspetos relacionados com o escoamento. O diâmetro do balão, do atual modelo genérico da plataforma aérea, é 4m. O comprimento considerado é 1m, visto que, desta feita, simplifica-se a análise efetuada durante a fase de pós-processamento, pois os resultados são facilmente recalculados para o comprimento desejado. Relativamente ao escoamento, é bidimensional, transitório, turbulento e isotérmico. Para além disso, considera-se para todas as simulações realizadas neste trabalho que o escoamento é uma massa de ar (vento) incompressível, cuja massa volúmica,  $\rho$ , corresponde a  $1,2kg/m^3$  e a viscosidade cinemática,  $\nu$ , a  $1,5 \times 10^{-5}m^2/s$  [5]. O número de *Reynolds* para um escoamento em torno de um cilindro é dado pela seguinte equação:

$$Re = \frac{DV_{\infty}}{\nu} \quad (5.1)$$

Com o auxílio do programa *Gmsh*, realiza-se a alteração da malha consoante as dimensões do problema. Ajustam-se alguns parâmetros relacionados com o domínio computacional e com o cilindro. Opta-se por um domínio computacional com uma geometria circular e com o cilindro no centro, como pode ser visto na Figura 5.2, onde está representada a malha usada na simulação. O domínio computacional, identificado pelo limite *domain\_boundary*, possui um diâmetro 80 vezes superior ao do cilindro, identificado pelo limite *wall*, isto porque se as paredes do cilindro estiverem muito próximas das paredes do domínio computacional provoca um efeito de bloqueamento, acabando por afetar o escoamento e a precisão dos resultados. Note-se que, após os ajustes necessários efetuados no ficheiro de texto, a malha foi gerada automaticamente no *Gmsh*, pelo que o domínio apresenta um tipo de malha não-ortogonal não-estruturada, como se pode ver na Figura 5.2-a), e na zona mais próxima da superfície do cilindro o tipo de malha é não-ortogonal estruturada, apresentado na Figura 5.2-b).



**Figura 5.2 – Representação da malha usada na simulação do cilindro gerada no programa Gmsh:**  
a) Domínio computacional; b) Malha junto às paredes do cilindro.

Na superfície do cilindro, na camada limite, são onde ocorrem as maiores variações de velocidade e de pressão do escoamento. Por outro lado, inicia-se também a formação de vórtices que se propagam para a esteira. Assim sendo, como se pode reparar pela Figura 5.2-a), a malha do domínio computacional, à medida que se aproxima do cilindro, vai sendo cada vez mais refinada, de modo a acompanhar essas variações.

Após a conversão da malha do *Gmsh* para o *OpenFOAM* e, agrupada a sua informação em vários ficheiros em formato de texto, são definidos os limites dos domínios que resultam da geração da malha. A estes limites é necessário definir os tipos de condição de fronteira, onde estão representados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2.

**Tabela 5.2 – Tipos de condições de fronteira atribuídas aos limites dos domínios no caso do cilindro.**

Limites dos Domínios	Descrição	Tipo de Condição de Fronteira
<i>cylinder</i>	Superfície cilíndrica.	<i>wall</i>
<i>domain_boundary</i>	Domínio computacional.	<i>patch</i>
<i>frontAndBack</i>	As duas faces projetadas segundo o eixo <i>z</i> .	<i>empty</i>

A condição de fronteira *wall* atribuída à superfície cilíndrica, tal como o nome indica, define a fronteira do cilindro como parede, tornando-se num obstáculo ao escoamento. Como resultado dessa atribuição, o escoamento é obrigado a contornar a superfície do cilindro. A condição de fronteira *patch*, atribuída ao domínio computacional, define uma fronteira que não apresenta informações geométricas ou topológicas sobre a malha. É atribuída para permitir a entrada ou a saída de escoamento no domínio computacional. Por último, a condição de fronteira *empty* é atribuída às duas faces projetadas segundo o eixo *z*, ou seja, as duas faces circulares do cilindro. Esta é utilizada em casos de estudo bidimensionais e aplicada nas superfícies cujo plano é normal à direção do eixo que não faz parte das direções que constituem a solução.

## 5.2 Modelo de Turbulência, Condições de Fronteira e Iniciais

Os diversos modelos de turbulência, existentes no ramo CFD, capazes de modelar o efeito de turbulência presente num escoamento, distinguem-se pelas equações que os constituem. Como referido anteriormente, as equações *RANS* descrevem, matematicamente, esse efeito de turbulência, através da média temporal das equações de *Navier-Stokes*.

Nesse sentido, o modelo de turbulência escolhido para modelar este caso é baseado nas equações *RANS* e, de modo a ir ao encontro de uma das características do escoamento, pretende-se também que esse modelo seja indicado para escoamentos incompressíveis. Por outro lado, com o intuito de garantir uma melhor precisão dos resultados, é desejável optar por um modelo de turbulência que utilize duas equações de transporte para representar os efeitos de turbulência do escoamento. Essas equações de transporte permitem considerar o efeito de convecção e difusão da energia turbulenta no escoamento, bem como a sua evolução temporal.



Os dois modelos de turbulência mais comuns capazes de satisfazer estas condições são:  $k - \epsilon$  e  $k - \omega$ . No entanto, o modelo de turbulência  $k - \epsilon$  não apresenta bons resultados em casos de grandes variações de pressão. Por outro lado, este modelo é desaconselhado para escoamentos com separação da camada limite, fluidos rotativos e em superfícies curvas [30]. Em relação ao modelo  $k - \omega$ , embora muito semelhante ao modelo  $k - \epsilon$ , apresenta uma diferença numa das equações de transporte. A principal vantagem deste modelo é o modo simples e exato como são calculadas as propriedades do escoamento junto à superfície das paredes. No entanto, na zona do escoamento não perturbado (longe das paredes) a taxa de dissipação tende para zero e a viscosidade turbulenta tende para um valor infinito [30]. Perante estes factos, *Menter* (1993) formulou um modelo alternativo ao modelo  $k - \omega$ , denominado por  $k - \omega SST$ .

A formulação *SST* (*Shear Stress Transport*) permite a combinação dos dois modelos acima descritos, isto é, tem a possibilidade de simular o comportamento do modelo  $k - \epsilon$  no escoamento não perturbado, (onde não ocorrem grandes variações de pressão) evitando o problema comum do modelo  $k - \omega$ . Por outro lado, simula o modelo  $k - \omega$  nas zonas onde ocorrem as tais variações de pressão, como na camada limite, junto às paredes do cilindro [34].

Em suma, o modelo de turbulência escolhido para este caso de estudo é o modelo  $k - \omega SST$ .

As duas equações de transporte que caracterizam este modelo de turbulência são:  $k$  e  $\omega$  ( $\omega_t$ ). A primeira representa a energia cinética de turbulência, ou seja, a energia cinética por unidade de massa das flutuações turbulentas presentes num escoamento turbulento. A unidade no Sistema Internacional (SI) é  $J/kg = m^2/s^2$ . A segunda simboliza a taxa de dissipação específica de turbulência, ou seja, é a taxa em que a energia cinética de turbulência,  $k$ , é convertida em energia térmica interna por unidade de volume e tempo. Por vezes é também referida como a frequência principal da turbulência. A unidade no SI é  $s^{-1}$  [35, 36].

Posto isto, é possível determinar as duas equações de transporte que constituem o respetivo modelo de turbulência. Primeiramente, calcula-se a equação de transporte  $k$ , sendo necessário definir a intensidade de turbulência [37]:

$$I = 0,16Re^{-\frac{1}{8}} \quad (5.2)$$

O número de *Reynolds* que se utiliza na equação (5.2) advém da equação (5.1), cujos valores estão na Tabela 5.1. Assim sendo, é expectável obter para cada simulação uma intensidade de turbulência diferente, visto que, cada simulação contém uma velocidade de vento diferente e, por conseguinte, um número de *Reynolds* diferente.

De modo a calcular o valor correspondente ao ficheiro  $k$  e, tendo em conta o modelo de turbulência usado, é necessário utilizar a seguinte equação, [38]:

$$k = \frac{3}{2} (V_{\infty} I)^2 \quad (5.3)$$

A equação de transporte  $\omega$  ( $\omega_t$ ) pode ser calculada do seguinte modo:

$$\omega_t = \frac{k^{0,5}}{C_{\mu} L_{ref}} \quad (5.4)$$

sendo que  $k$  é a energia cinética de turbulência,  $C_{\mu}$  é uma constante relacionada com o modelo de turbulência que corresponde a 0,09 e  $L_{ref}$  é o comprimento de referência que corresponde ao diâmetro do cilindro, neste caso 4m [38].

Finalizando, na Tabela 5.3, surgem os resultados das equações de transporte,  $k$  e  $\omega$ , utilizadas em cada simulação.

**Tabela 5.3 – Apresentação dos resultados das equações de transporte  $k$  e  $\omega$ .**

Simulação	Intensidade de Turbulência, $I$	Energia Cinética de Turbulência, $k$ , [ $m^2/s^2$ ]	Taxa de Dissipação Específica de Turbulência, $\omega_t$ , [ $s^{-1}$ ]
1	$3,1 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-1}$
2	$2,9 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-1}$
3	$2,8 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$3,8 \times 10^{-1}$
4			
5			
6			
7	$2,7 \times 10^{-2}$	$3,7 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-1}$
8	$2,6 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-1}$
9	$2,4 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$	1

Após a apresentação do modelo de turbulência segue-se a definição das condições de fronteira para cada condição inicial. As condições iniciais qualificam e quantificam as propriedades do escoamento no instante inicial da simulação. Essas propriedades são: velocidade, pressão e as duas equações de transporte acima calculadas. Existe uma diferença na atribuição da condição de fronteira, entre os dois casos de estudo do cilindro, na condição inicial da velocidade, pois num dos casos, o cilindro é estacionário e no outro tem uma velocidade angular. Pelo que, primeiramente, apresenta-se na Tabela 5.4 as condições iniciais para o caso do escoamento em torno do cilindro estacionário e, posteriormente, na Tabela 5.5 o segundo caso.

Tabela 5.4 – Condições iniciais e respectivas condições de fronteira.

Condições Iniciais	Propriedade do Escoamento	Limites dos Domínios	Condição de Fronteira	Descrição
$U$	Velocidade	<i>cylinder</i>	<i>noSlip</i>	Condição de não-escorregamento nas paredes do cilindro.
		<i>domain_boundary</i>	<i>freestreamValue</i>	A velocidade do vento toma um valor fixo em cada simulação.
		<i>frontAndBack</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.
$p$	Pressão	<i>cylinder</i>	<i>zeroGradient</i>	O gradiente de pressões no cilindro é 0.
		<i>domain_boundary</i>	<i>zeroGradient</i>	O gradiente de pressões no domínio é 0. É considerada pressão relativa.
		<i>frontAndBack</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.
$k$	Turbulência	<i>cylinder</i>	<i>kqRWallFunction</i>	O efeito de turbulência no cilindro é 0.
		<i>domain_boundary</i>	<i>fixedValue</i>	Valor calculado para cada simulação.
		<i>frontAndBack</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.
$\omega$	Turbulência	<i>cylinder</i>	<i>\omegaWallFunction</i>	O efeito de turbulência no cilindro é 0.
		<i>domain_boundary</i>	<i>fixedValue</i>	Valor calculado para cada simulação.
		<i>frontAndBack</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.

A condição de não-escorregamento (*noSlip*) nas paredes do cilindro é uma condição física onde um fluido em contacto com uma superfície sólida possui velocidade nula em relação a essa superfície. Em relação à condição de fronteira *freestream*, atribuída ao domínio computacional, considera que esse domínio corresponde à velocidade do escoamento não

perturbado, o qual é representado por um vetor ( $\vec{V}_x \vec{V}_y \vec{V}_z$ ). Ao atribuir um valor à componente  $\vec{V}_x$ , por exemplo ( $\vec{V}_x 0 0$ ), considera-se que o escoamento tem apenas componente em  $x$  e, tendo em conta o referencial representado na Figura 5.2, é possível definir também o sentido e direção do escoamento. Por fim, as condições de fronteira *kqRWallFunction* e *omegaWallFunction* que estão presentes nas condições iniciais das equações de transporte  $k$  e  $\omega$ , respetivamente, são impostas à condição de fronteira de parede, como é o caso do cilindro.

De seguida, apresenta-se então na Tabela 5.5, a alteração da condição de fronteira atribuída à condição inicial da velocidade do caso do escoamento em torno do cilindro em rotação. A alteração surge na necessidade de impor, no sentido horário, a velocidade angular ao cilindro.

**Tabela 5.5 – Alteração da condição de fronteira à condição inicial da velocidade do escoamento.**

Condições iniciais	Propriedade do Escoamento	Limites dos Domínios	Designação	Descrição
$U$	Velocidade	<i>Cylinder</i>	<i>rotatingWallVelocity</i>	Junto às paredes do cilindro o fluido possui uma velocidade angular no sentido horário.
		<i>domain_boundary</i>	<i>freestreamValue</i>	A velocidade do vento toma um valor fixo em cada simulação.
		<i>frontAndBack</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.

A condição de não-eskorregamento deixa de ser aplicada. Neste caso a velocidade do fluido não é nula relativamente à superfície do cilindro, pois junto a esta, o fluido apresenta uma velocidade angular no sentido horário. Este facto, permite que o cilindro esteja parado e o fluido na sua superfície possua uma dada velocidade angular.

### 5.3 Outros Parâmetros da Simulação Numérica

Para completar a informação necessária do presente caso de estudo restam definir alguns parâmetros da simulação. Os primeiros estão relacionados com o tempo de simulação. Assim, na Tabela 5.6, está presente essa informação.

**Tabela 5.6 – Parâmetros da simulação numérica relativos ao tempo de simulação.**

Parâmetros	Valor		Descrição
<i>startTime</i>	0		Tempo inicial da simulação.
<i>endTime</i>	60	40	Tempo final da simulação.
<i>deltaT</i>	0,001		Passo de tempo da simulação.
<i>writeControl</i>	<i>adjustableRunTime</i>		Passo de tempo ajustável de acordo com o número máximo de <i>Courant</i> .
<i>writeInterval</i>	0,1		Passo de tempo com que o OF escreve as pastas de tempo.

O tempo final da simulação varia porque no caso do cilindro estacionário há uma maior libertação de vórtices e turbulência, logo o escoamento necessita de mais tempo para estabilizar.

De seguida, são apresentadas na Tabela 5.7, as bibliotecas utilizadas na simulação numérica. As bibliotecas presentes no *OpenFOAM* não são capazes de resolver as equações, apenas servem para fornecer a informação necessária para o processamento da simulação que não é dada no código numérico original. Por outro lado, permite incutir ao OF a informação necessária de modo a selecionar a respetiva biblioteca que cumpra com os objetivos do que se pretende estudar.

**Tabela 5.7 – Bibliotecas do *OpenFOAM* utilizadas nas simulações do caso do cilindro.**

Bibliotecas	Descrição
<i>libforces.so</i>	Informação para o cálculo das forças e dos coeficientes aerodinâmicos.
<i>libOpenFOAM.so</i>	Biblioteca principal do <i>OpenFOAM</i> .
<i>libincompressibleRASmodels.so</i>	Informação dos modelos <i>RAS</i> existentes no <i>OpenFOAM</i> .

Finalizando este subcapítulo e de modo a complementar a informação imposta pelas bibliotecas anteriormente selecionadas, é necessário estabelecer no *OpenFOAM* as funções que se pretendem calcular, nomeadamente, as forças (função *forces*) e os coeficientes aerodinâmicos (função *forceCoeffs*). Nesse sentido, na Tabela 5.8, surge a informação que é imposta ao OF para que o mesmo consiga determinar as respetivas funções consoante a variação das propriedades do escoamento ao longo da simulação.

**Tabela 5.8 – Parâmetros impostos no OF para o cálculo das funções *forces* e *forceCoeffs*.**

Parâmetros	Valor	Descrição
<i>patches</i>	<i>cylinder</i>	Região do domínio na qual se quer determinar as forças e os coeficientes aerodinâmicos.
<i>rhoInf</i>	1,2	Massa volúmica do fluido.
<i>CofR</i>	(0 0 0,5)	Centro de rotação.
<i>pitchAxis</i>	(0 0 1)	Eixo de rotação.
<i>liftDir</i>	(0 1 0)	Direção do vetor da força de sustentação.
<i>dragDir</i>	(1 0 0)	Direção do vetor da força de arrasto.
<i>magUInf</i>	Variável em cada simulação	Velocidade do escoamento não perturbado, $V_{\infty}$ .
<i>lRef</i>	4	Comprimento de referência é igual ao valor do diâmetro do cilindro.
<i>ARef</i>	4	Área de referência é dada pelo produto do comprimento de referência pelo comprimento do cilindro.

Após fornecer a informação necessária ao OF, este calcula, pela imposição da função *forces*, três tipos de forças: forças de pressão, forças viscosas e forças devido à porosidade. Para além disso, calcula também os momentos associados a essas forças: momento devido às forças de pressão, momento devido às forças viscosas e momento devido às forças porosas. Tanto as forças como os momentos são calculados segundo a componente  $x$ ,  $y$  e  $z$ . No entanto, como o escoamento é bidimensional, as forças segundo a componente  $z$  são zero. Por outro lado, as forças porosas e o respetivo momento também são zero porque simplesmente não existem neste caso de estudo. Resumindo, apenas são determinadas, segundo as componentes  $x$  e  $y$ , as forças de pressão e as forças viscosas. Por esta razão, os momentos existentes são apenas segundo a componente  $z$ .

Em cada elemento de área, na superfície do cilindro, existe uma força de pressão que é provocada pelo contacto entre o escoamento e essa superfície. A força de pressão é sempre, em cada elemento de área, normal à superfície do cilindro, logo a direção de cada força vai passar sempre pelo centro do cilindro e, por essa razão, o momento associado a essa força é zero. A pressão pode ser dada pela seguinte equação [3]:

$$p = \frac{F_N}{A_t} \quad (5.5)$$

onde  $F_N$  é a força normal a uma dada superfície e  $A_t$  a área total de um dado elemento de malha onde a força normal é aplicada.

Relativamente às forças viscosas, são provocadas pelo efeito de atrito viscoso devido ao contacto entre o escoamento e a superfície do cilindro no interior da camada limite, dando origem a tensões de atrito viscosas. O OF considera as forças viscosas como produtos dessas tensões de atrito viscosas por elementos de área na superfície do cilindro. O momento devido

às forças viscosas, segundo a componente  $z$  não é zero, pois a direção das forças viscosas não passa pelo centro do cilindro, pelo que o braço da força é o diâmetro do cilindro. Para números de *Reynolds* elevados as forças de pressão são superiores às forças viscosas.

A imposição da função *forceCoeffs* ao *OpenFOAM*, permite calcular os coeficientes aerodinâmicos a partir das forças de pressão acima descritas. O coeficiente de sustentação utiliza a componente  $y$  e o coeficiente de arrasto a componente  $x$  das forças de pressão.

## 5.4 Apresentação de Resultados

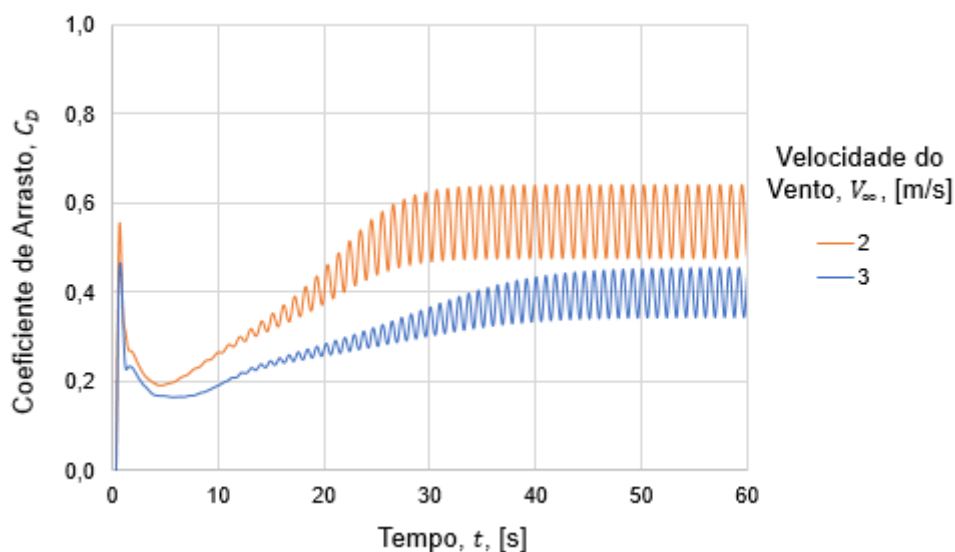
### 5.4.1 Escoamento em Torno de Um Cilindro Estacionário

Recapitulando as características das duas simulações referentes ao escoamento em torno de um cilindro estacionário, segue-se a Tabela 5.9.

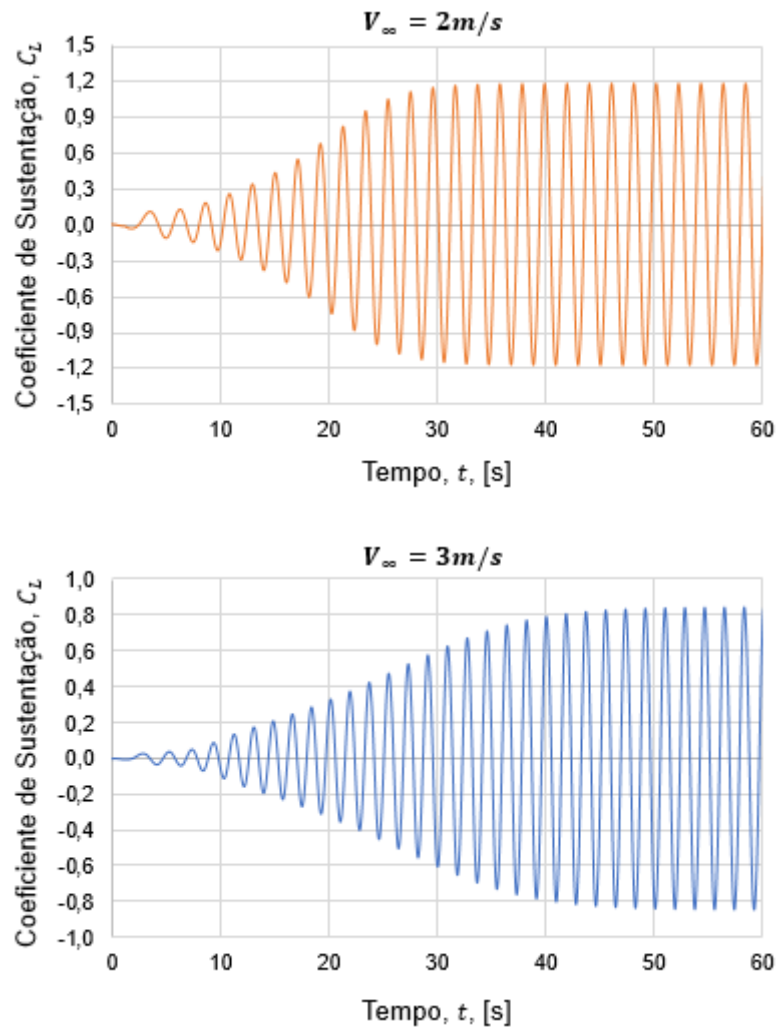
**Tabela 5.9 – Características das duas simulações referentes ao escoamento em torno do cilindro estacionário.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_\infty$ , [m/s]	Velocidade Angular do Balão, $\omega$		TSR	Número de Reynolds, $Re$
		[rad/s]	[RPM]		
1	2	0		0	$5,3 \times 10^5$
2	3				$8 \times 10^5$

Após a apresentação dos parâmetros de simulação, segue-se a análise crítica dos resultados obtidos. Na Figura 5.3 e na Figura 5.4 surgem, respetivamente, os valores do coeficiente de arrasto,  $C_D$ , e do coeficiente de sustentação,  $C_L$ . Resultados esses, que advêm das simulações 1 e 2.



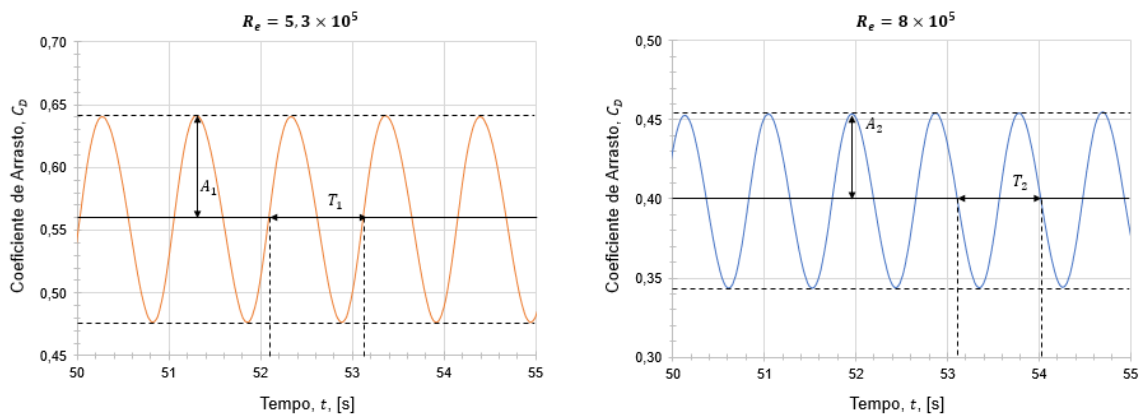
**Figura 5.3 – Apresentação dos resultados do coeficiente de arrasto das simulações 1 e 2.**



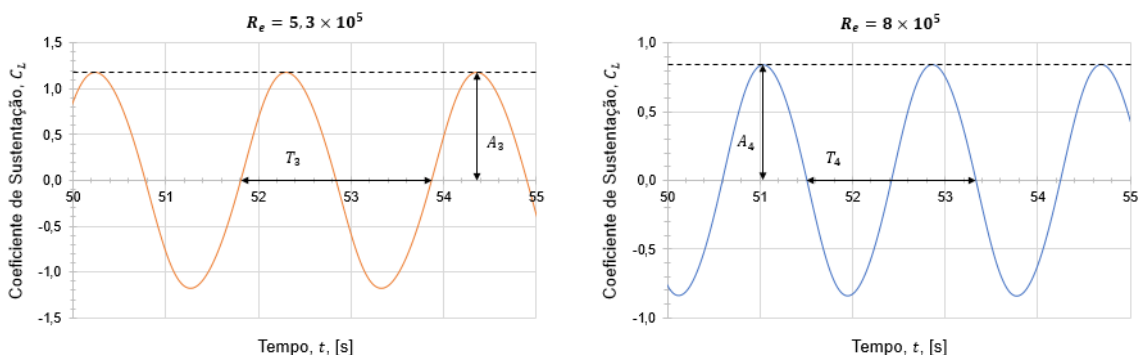
**Figura 5.4 – Apresentação dos resultados do coeficiente de sustentação das simulações 1 e 2.**

Analisando a Figura 5.3 e a Figura 5.4, o regime periódico que é atingido em cada simulação, tanto para a determinação do coeficiente de arrasto como para o coeficiente de sustentação, varia com o número de *Reynolds* e, por conseguinte, com a velocidade do vento. Quanto maior é esse número, maior é o tempo decorrido para o qual se atinge o regime periódico. Por outro lado, verifica-se também que as frequências, correspondentes aos regimes periódicos tanto do  $C_D$  como do  $C_L$ , aumentam com o número de *Reynolds* e, em contrapartida, a amplitude diminui. É possível visualizar este facto em pormenor na Figura 5.5 e na Figura 5.6, onde posteriormente, são calculadas as frequências e amplitudes de cada simulação.





**Figura 5.5 – Apresentação em pormenor das amplitudes e dos períodos de cada simulação referentes ao coeficiente de arrasto.**



**Figura 5.6 – Apresentação em pormenor das amplitudes e dos períodos de cada simulação referentes ao coeficiente de sustentação.**

As amplitudes,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$  podem ser retiradas diretamente de cada gráfico da Figura 5.5 e da Figura 5.6, respetivamente.

- $A_1 \cong 0,08$ ;
- $A_2 \cong 0,06$ ;
- $A_3 \cong 1,2$ ;
- $A_4 \cong 0,85$ .

Em relação ao cálculo da frequência, é necessário, primeiro, retirar diretamente de cada gráfico da Figura 5.5 e da Figura 5.6 os respetivos períodos,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  e  $T_4$ .

- $T_1 \cong 1 \text{ s}$ ;
- $T_2 \cong 0,9 \text{ s}$ ;
- $T_3 \cong 2 \text{ s}$ ;
- $T_4 \cong 1,8 \text{ s}$ .

Como a frequência corresponde ao inverso do período, resta então determinar as frequências referentes a cada período acima apresentado:

- $f_1 = 1/T_1 = 1/1 \cong 1 \text{ Hz}$ ;
- $f_2 = 1/T_2 = 1/0,9 \cong 1,1 \text{ Hz}$ ;
- $f_3 = 1/T_3 = 1/2 \cong 0,5 \text{ Hz}$ ;
- $f_4 = 1/T_4 = 1/1,8 \cong 0,55 \text{ Hz}$ .

É possível observar que tanto o coeficiente de arrasto como o coeficiente de sustentação apresentam variações dos seus valores ao longo da simulação. No caso da variação do sinal do coeficiente de sustentação,  $C_L$ , resulta da alternância da intensidade de pressão e, por sua vez, da velocidade do escoamento, entre as zonas superiores e inferiores do cilindro. Esta variação do  $C_L$  provoca pequenos movimentos ascendentes e descendentes que, consequentemente, alterna positiva e negativamente o sentido da força de sustentação segundo o eixo y. Como a frequência aumenta com o número de *Reynolds* e, relacionando estes dados com o projeto da *Omnidea*, conclui-se que no instante inicial da descolagem, quando a plataforma aérea se encontra parada, ocorrerá um maior número de movimentos ascendentes e descendentes à medida que a velocidade do vento aumenta. No entanto, a distância percorrida nesses movimentos é superior para baixas velocidades de vento, visto que a amplitude do coeficiente de sustentação diminui com o aumento do número de *Reynolds*, resultando numa diminuição do módulo da força de sustentação.

Relativamente ao coeficiente de arrasto, parâmetro adimensional que quantifica a resistência que o cilindro provoca ao escoamento, também apresenta variações do seu valor ao longo do tempo de simulação. Este facto, resulta do fenómeno de vorticidade e de turbulência associados ao escoamento.

Na Figura 5.7 e na Figura 5.8 é possível, utilizando a ferramenta *ParaView* do OF, observar a intensidade da velocidade e da pressão correspondentes ao último passo de tempo de cada simulação. Consegue-se reconhecer o ponto de estagnação, identificado pelo algarismo 1, onde a velocidade do escoamento é 0 e os dois pontos de separação, identificados pelo algarismo 2, ambos presentes na Figura 5.7-a) e Figura 5.8-b). A partir do algarismo 2 a camada limite laminar deixa de ser aplicável e intensifica-se a velocidade do escoamento. Na zona de formação dos vórtices a intensidade da velocidade é baixa e a pressão é alta. Consoante os movimentos ascendentes e descendentes do balão vai-se alternando a intensidade máxima da velocidade do escoamento entre a zona superior e inferior na superfície do cilindro. À medida que o vórtice se propaga na esteira, as intensidades da velocidade e da pressão tendem para os valores do escoamento não perturbado e o próprio vórtice perde também a sua intensidade, acabando por desaparecer. A pressão tem um valor negativo porque se trata de pressão relativa.

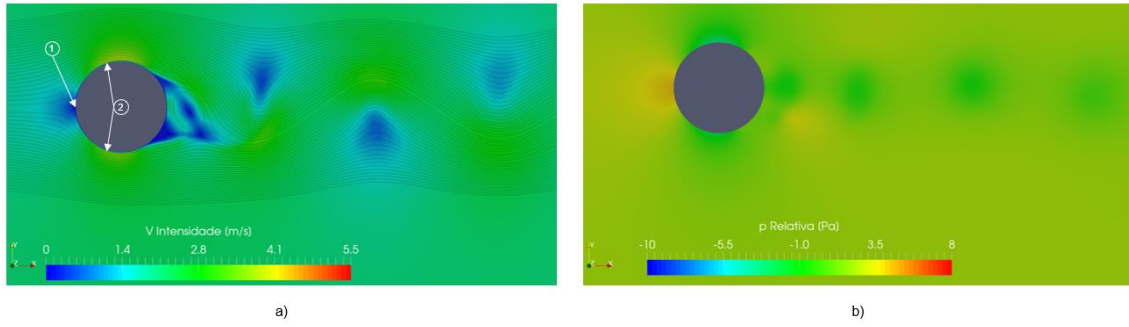


Figura 5.7 – Intensidade das componentes: a) velocidade; b) pressão relativa;  $R_e = 5,3 \times 10^5$ .

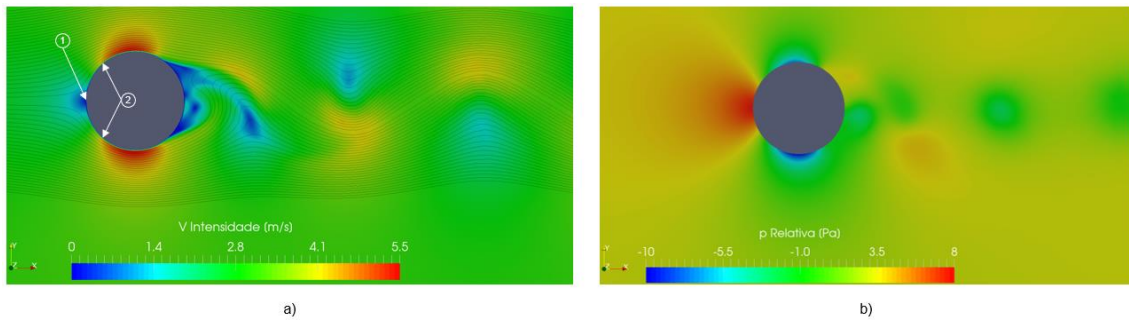


Figura 5.8 – Intensidade das componentes: a) velocidade; b) pressão relativa;  $R_e = 8 \times 10^5$ .

De modo a validar os resultados numéricos obtidos nestas simulações, é possível efetuar uma comparação com um artigo já publicado, Yuce *et al.* [39]. Este corresponde a um estudo idêntico ao efetuado neste trabalho. Na Figura 5.9, constam os resultados numéricos e experimentais do coeficiente de arrasto, em função do número de *Reynolds*, para o escoamento em torno de um cilindro estacionário publicado no artigo [39].

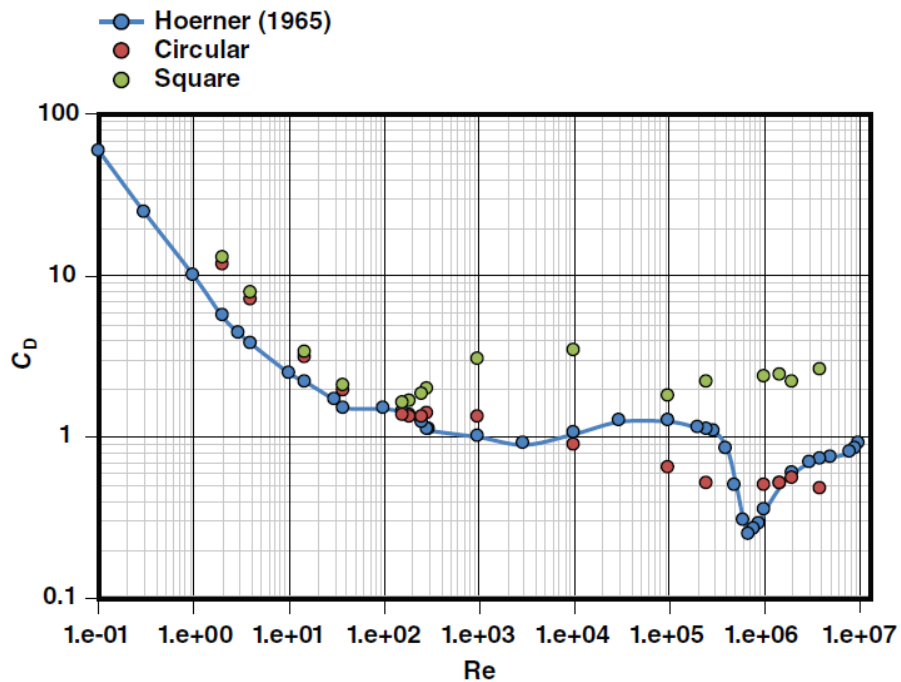


Figura 5.9 – Resultados numéricos e experimentais. Adaptado de [39].

Para validar os resultados do presente trabalho, note-se para a curva a azul que corresponde a um estudo experimental, cujo autor está mencionado na Figura 5.9 (Hoerner 1965). Os pontos assinalados a vermelho correspondem a um estudo numérico, no entanto, como o número de *Reynolds* é diferente ao calculado neste trabalho, não é possível efetuar a validação. Assim, esses valores servem apenas como referência, permitindo analisar os resultados obtidos para um número de *Reynolds* próximo. De seguida, na Tabela 5.10, surgem os resultados obtidos no presente trabalho e os resultados experimentais obtidos por Hoerner (1965).

**Tabela 5.10 – Apresentação dos valores do coeficiente de arrasto.**

Simulação	$R_e$	Coeficiente de Arrasto Médio, $\overline{C_D}$	Coeficiente de Arrasto, $C_D$ , Hoerner (1965), exp.	Erro relativo, [%]
1	$5,3 \times 10^5$	0,56	0,5	12
2	$8 \times 10^5$	0,4	0,28	42

Ao observar a Figura 5.9, constata-se que as simulações 1 e 2 estão na zona crítica do coeficiente de arrasto. Ou seja, nos números de *Reynolds* em que as duas simulações são realizadas ocorre uma diminuição abrupta do coeficiente de arrasto do cilindro. Isso deve-se à transição, na parede do cilindro, da camada limite laminar para turbulenta e, por essa razão, o erro relativo da simulação 2 é mais acentuado comparativamente à simulação 1. Esse fenómeno exige um maior refinamento da malha nessa zona particular e requer uma fase de processamento mais minuciosa, resultando numa maior complexidade de cálculo para o programa *OpenFOAM*. O facto de as simulações neste trabalho serem realizadas a duas dimensões provoca uma maior propagação do erro. Por outro lado, as equações dos modelos de turbulência, que se utilizam nos programas CFD, não conseguem determinar todos os fenómenos naturais associados à turbulência e o impacto que estes provocam no escoamento e na camada limite do problema em questão.

Para finalizar, resta apenas retirar a força de arrasto média durante o regime periódico, baseada nos resultados numéricos obtidos neste trabalho, que é apresentada na Tabela 5.11. De notar, que a força de arrasto é calculada para 1m de comprimento do cilindro.

**Tabela 5.11 – Apresentação das forças de arrasto obtidas neste trabalho.**

Simulação	$R_e$	Força de Arrasto Média, $\overline{F_D}$ , [N]	Tempo de Simulação [horas]
1	$5,3 \times 10^5$	17	24
2	$8 \times 10^5$	27	24

Em relação aos resultados obtidos referentes ao coeficiente de sustentação, estão de acordo com os valores esperados. Após se atingir o regime periódico, a média do coeficiente

de sustentação é zero e, por conseguinte, a força de sustentação média também é zero. Isto porque, o cilindro não possui velocidade angular, logo não existe uma das condições necessárias para a criação do efeito *Magnus*. No entanto, a força de sustentação oscila, positiva e negativamente ao longo do tempo, representando, como referido anteriormente, os movimentos oscilatórios do cilindro perpendiculares ao sentido do escoamento.

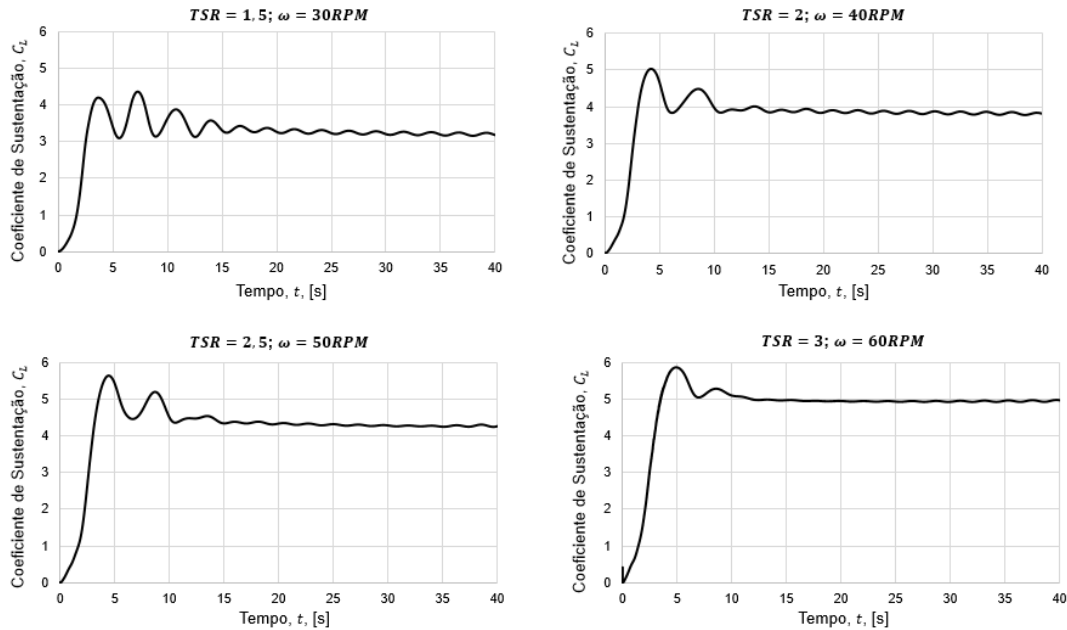
### 5.4.2 Escoamento em Torno de Um Cilindro em Rotação

O caso de estudo que se segue divide-se em 7 simulações. Primeiramente, é feita uma análise às 4 primeiras simulações. De modo a relembrar as características das simulações 3, 4, 5 e 6, apresenta-se a Tabela 5.12.

**Tabela 5.12 – Características das quatro primeiras simulações referentes ao escoamento em torno de um cilindro em rotação.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_\infty$ , [m/s]	Velocidade Angular do Balão, $\omega$		TSR	Número de Reynolds, $R_e$
		[rad/s]	[RPM]		
3	4	6,28	60	3	$1 \times 10^6$
4		5,24	50	2,5	
5		4,19	40	2	
6		3,14	30	1,5	

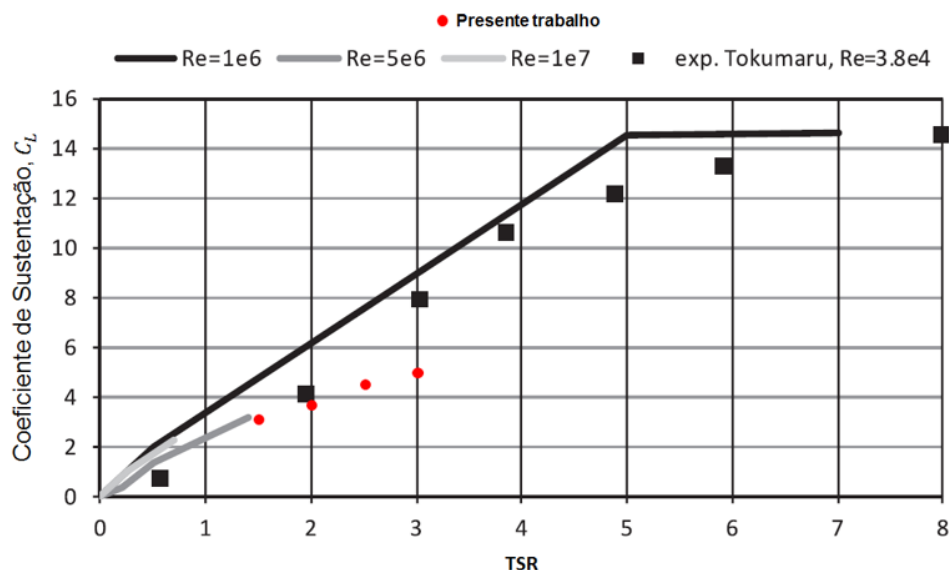
As simulações realizam-se todas à mesma velocidade de vento fazendo variar a velocidade angular do cilindro e, por sua vez, variar o *TSR*. Na Figura 5.10 estão representados os coeficientes de sustentação,  $C_L$ , que foram obtidos nas respetivas simulações.



**Figura 5.10 – Apresentação dos coeficientes de sustentação,  $C_L$ , para cada *TSR*.**

Ao analisar a Figura 5.10, pode-se constatar que à medida que o  $TSR$  aumenta, ou seja, quanto maior é a velocidade angular do cilindro, maior é o coeficiente de sustentação médio e, por conseguinte, maior é a força de sustentação da plataforma aérea para atingir a alta altitude. Este facto permite validar uma das condições do efeito *Magnus*. Como dito anteriormente no capítulo 1, a força de sustentação criada por este efeito é proporcional à velocidade angular do cilindro. Neste caso provoca apenas movimento ascendente, pois o coeficiente de sustentação é sempre positivo e praticamente constante quando a simulação estabiliza. Ao invés dos repetidos movimentos ascendentes e descendentes quando o mesmo se encontra estacionário. Assim, permite uma maior estabilização de toda a plataforma aérea e protege a integridade física do sistema.

É possível efetuar uma comparação dos resultados obtidos na Figura 5.10 com o artigo [40]. Neste artigo é realizado um estudo numérico bastante semelhante, a duas dimensões, sobre o efeito *Magnus* aplicado num cilindro liso que foi feito em colaboração com a *Omnidea*. No entanto, na altura considerou-se os resultados demasiado otimistas. Na Figura 5.11 e, posteriormente, na Tabela 5.13, constam os resultados obtidos nos dois trabalhos.



**Figura 5.11 – Comparação do  $C_L$  entre os resultados obtidos nos dois trabalhos. Adaptado de [40].**

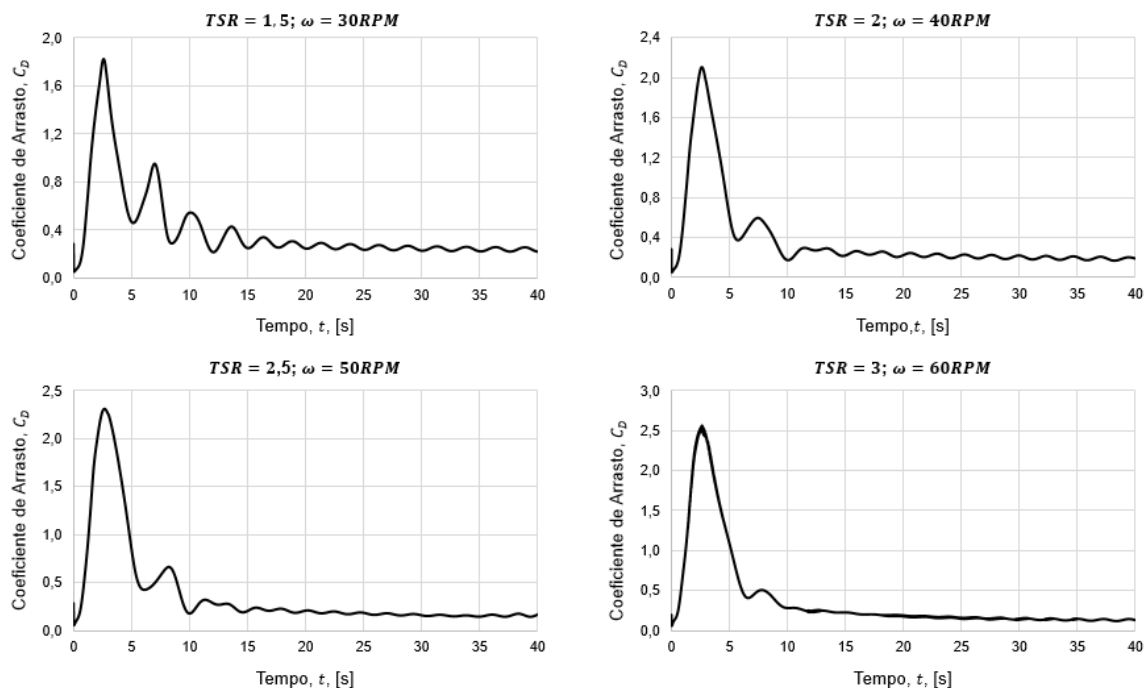
Na Figura 5.11 constam os resultados numéricos obtidos no artigo [40] e os resultados obtidos neste trabalho. Só é possível fazer uma comparação entre eles com a curva correspondente a  $Re = 1 \times 10^6$ , visto que, é o número de *Reynolds* comum aos dois resultados.

**Tabela 5.13 – Apresentação dos resultados dos coeficientes de sustentação obtidos neste trabalho e no artigo [40].**

Simulação	$R_e$	$TSR$	Velocidade Angular do Cilindro, $\omega$ , [RPM]	Coeficiente de Sustentação Médio, $\overline{C_L}$	Coeficiente de Sustentação, $C_L$ , [40]
3	$1 \times 10^6$	3	60	5	9
4		2,5	50	4,3	7,5
5		2	40	3,8	6
6		1,5	30	3,2	5

Perante a Figura 5.11 e a Tabela 5.13, verifica-se que ambos os resultados obtidos assumem um comportamento crescente, no entanto, os resultados que constam no artigo [40] crescem mais rapidamente que os resultados obtidos neste trabalho. A razão pela qual isso acontece, deve-se a vários fatores, isto porque, apesar do objetivo dos dois estudos numéricos ser o mesmo, existem algumas diferenças em relação às simulações de cada trabalho, por exemplo, o tipo de programa CFD que é utilizado e, em consequência disso, toda a modelação do problema, como o modelo de turbulência, o código numérico e a estrutura da malha. Por outro lado, devido às variações de pressão e de velocidade do escoamento à medida que a velocidade angular do cilindro aumenta, proporciona uma maior exigência de processamento de dados por parte do programa CFD, logo uma maior propagação do erro. Ao efetuar esta comparação, chega-se à conclusão que os resultados deste trabalho são mais conservativos em relação aos resultados do artigo [40], conseguindo colmatar os resultados demasiados otimistas na altura. De salientar, que os resultados obtidos neste trabalho e no artigo [40] são estudos numéricos, realizados a duas dimensões, o que implicam grandes limitações na precisão dos resultados. Antes de se efetuar qualquer conclusão, é necessário realizar um estudo experimental, visto que, nesse caso, seguramente, os resultados obtidos serão muito mais viáveis.

Findada a análise ao coeficiente de sustentação, seguem-se, na Figura 5.12, os coeficientes de arrasto,  $C_D$ , referentes às mesmas simulações 3, 4, 5 e 6 que são apresentados também para vários valores de  $TSR$ .



**Figura 5.12 – Apresentação dos coeficientes de arrasto,  $C_D$ , para cada  $TSR$ .**

Contrariamente ao coeficiente de sustentação médio, conforme a Figura 5.12, o coeficiente de arrasto médio diminui com o aumento do  $TSR$ , ou seja, quanto maior for a velocidade angular do cilindro, menor é o coeficiente de arrasto e, por sua vez, menor é a força de arrasto. Tal como em relação ao coeficiente de sustentação, aqui, é vantajoso que a plataforma aérea opere com maiores velocidades angulares, porque quanto menor for a força de arrasto, menor são as perturbações que a mesma sente. É também possível observar que após a estabilização das simulações, a variação do  $C_D$  é muito pouca, tornando-se quase constante. Isso deve-se ao facto de o escoamento ser estacionário e a libertação de vórtices ser substituída por uma esteira que se propaga no sentido do escoamento. Este fenómeno pode ser visto mais à frente na Figura 5.14.

É também possível comparar estes resultados com o mesmo artigo, referenciado em [40]. Na Figura 5.13 e, posteriormente, na Tabela 5.14, surgem os coeficientes de arrasto e a respetiva comparação.



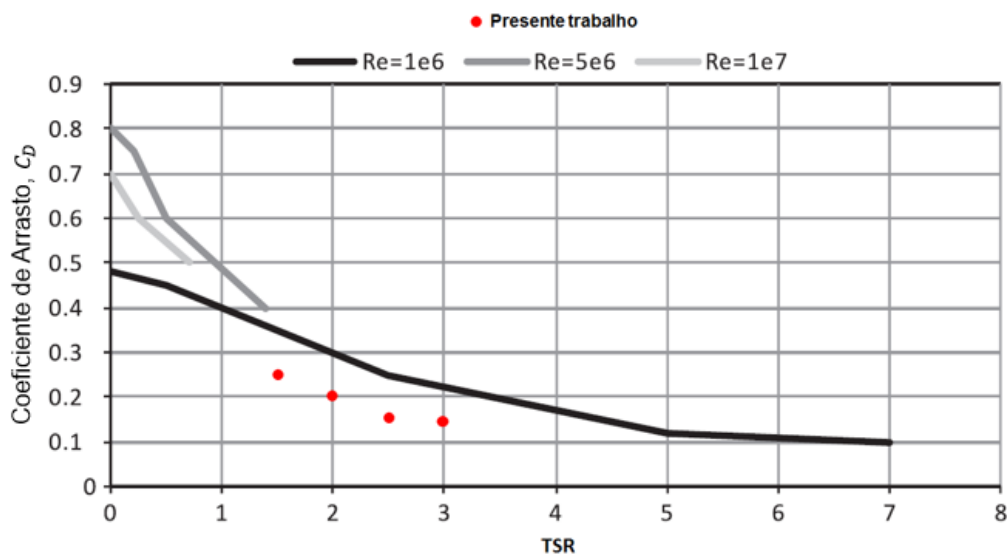


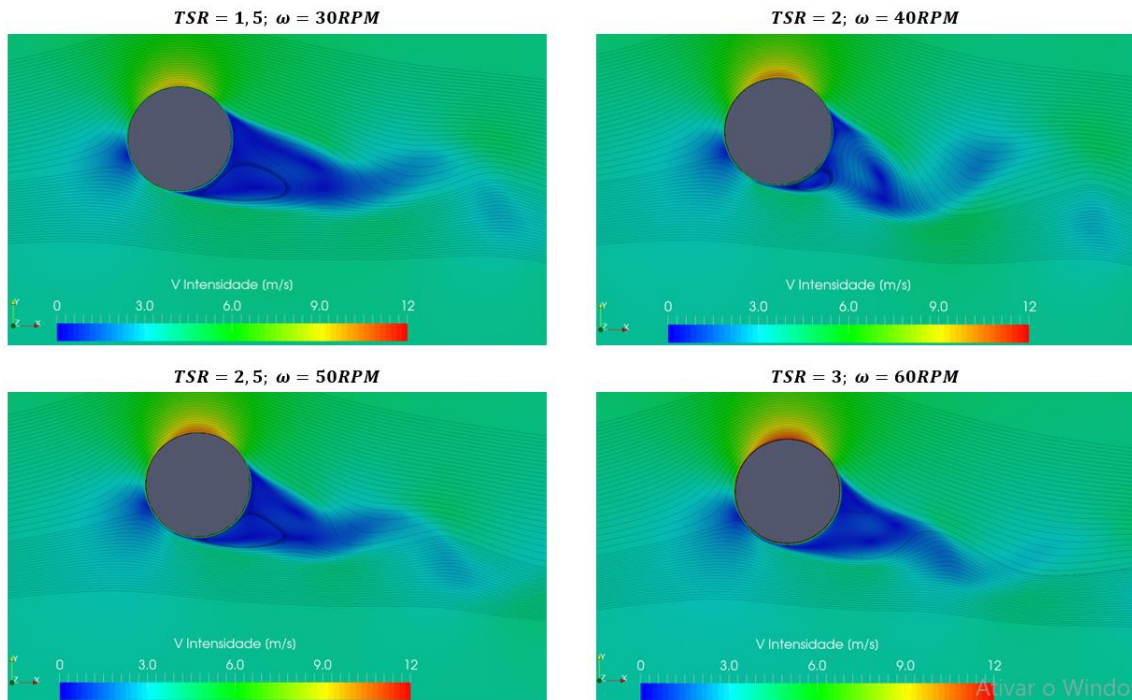
Figura 5.13 – Comparação do  $C_D$  entre os resultados obtidos nos dois trabalhos. Adaptado de [40].

Tabela 5.14 – Apresentação dos resultados dos coeficientes de arrasto obtidos neste trabalho e no artigo [40].

Simulação	$Re$	TSR	Velocidade Angular do Cilindro, $\omega$ , [RPM]	Coeficiente de Arrasto Médio, $\overline{C_D}$	Coeficiente de Arrasto, $C_D$ , [40]
3	$1 \times 10^6$	3	60	0,15	0,22
4		2,5	50	0,17	0,25
5		2	40	0,2	0,3
6		1,5	30	0,25	0,35

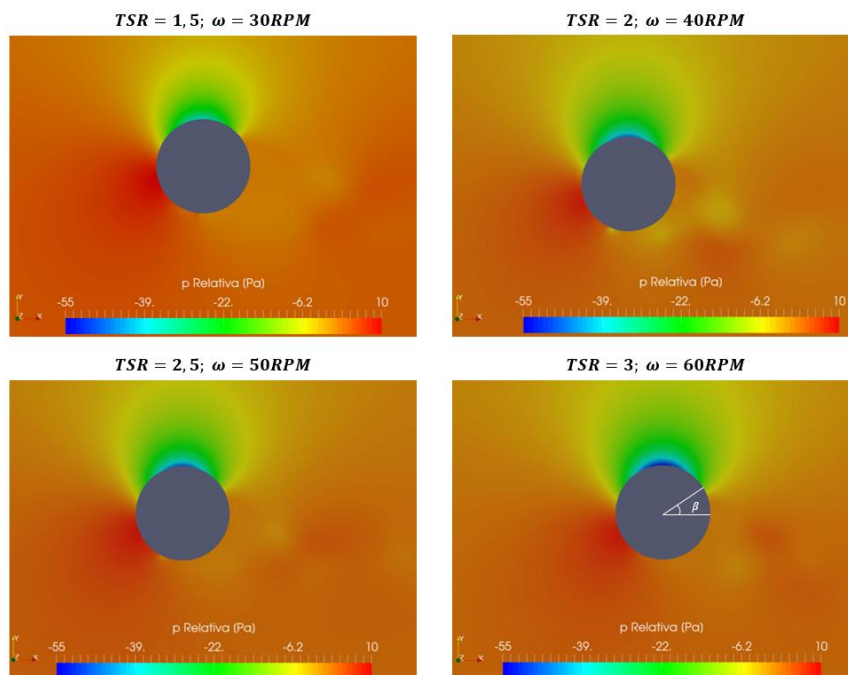
Perante a Figura 5.13 e a Tabela 5.14, constata-se que ambos os resultados obtidos assumem um comportamento decrescente. Tal como no caso do coeficiente de sustentação, os resultados do coeficiente de arrasto obtidos neste trabalho também são mais conservativos em relação ao artigo [40]. Neste caso, os resultados apresentam uma discrepância mais uniforme.

Por fim, na Figura 5.14, utilizando a ferramenta *ParaView* do OF, é possível observar a intensidade da velocidade correspondente ao último passo de tempo de cada simulação. Note-se para a formação de uma esteira, praticamente homogênea, que depois se propaga ao longo do escoamento acabando por desaparecer. A velocidade do escoamento é máxima na zona superior do cilindro, pois a velocidade angular do mesmo (no sentido horário) provoca um aceleração do escoamento, pelo que há um maior número de linhas de corrente nessa zona. Como é natural, a intensidade da velocidade máxima do escoamento vai aumentando à medida que a velocidade angular do cilindro aumenta.



**Figura 5.14 – Intensidade da velocidade do escoamento para diferentes valores de  $TSR$ .**

De seguida, na Figura 5.15, surge a variação de pressão também correspondente ao último passo de tempo. A pressão é maior na zona inferior do cilindro, pois corresponde à zona onde a velocidade do escoamento é menor, ou seja, é validada a equação de *Bernoulli* na caracterização do efeito de *Magnus*, referenciada no capítulo 1. Essa diferença de pressões permite um movimento ascendente do cilindro. Na Figura 5.15, surgem pressões negativas porque ao longo da simulação é considerada pressão relativa.



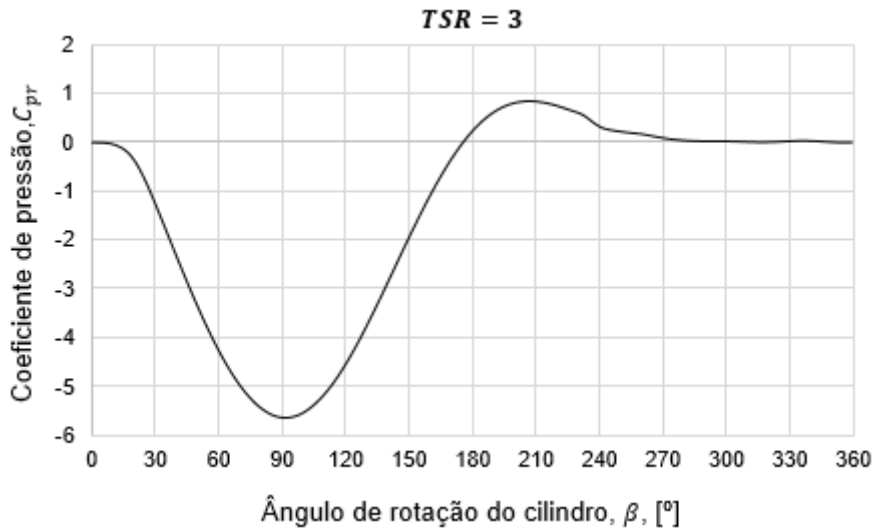
**Figura 5.15 – Intensidade da pressão relativa do escoamento para diferentes valores de  $TSR$ .**

Conforme apresentado na Figura 5.15, a diferença de pressões entre a zona superior e inferior do cilindro aumenta com a velocidade angular do cilindro, logo como a força de sustentação é tanto maior quanto essa diferença de pressões, conclui-se que  $F_{L(\omega=60RPM)} > F_{L(\omega=30RPM)}$ . Tendo em conta que a velocidade do escoamento não perturbado não varia de simulação para simulação, o coeficiente de sustentação aumenta com a velocidade angular do cilindro, tal como é apresentado na Tabela 5.13.

Para melhor se perceber a evolução da pressão em torno do cilindro é apresentada a Figura 5.16, onde está representado a evolução do coeficiente de pressão,  $C_{pr}$ , em função do ângulo de rotação do cilindro,  $\beta$  (conforme apresentado na Figura 5.15,  $TSR = 3$ ), correspondente ao último passo de tempo. O coeficiente de pressão pode ser obtido pela seguinte equação:

$$C_{pr} = \frac{p_{rel}}{0,5\rho V_{\infty}^2} \quad (5.6)$$

onde  $p_{rel}$  corresponde à pressão relativa na superfície do cilindro que resulta da diferença entre a pressão estática do escoamento no ponto em que o coeficiente de pressão é avaliado e a pressão do escoamento não perturbado. De modo a facilitar a leitura da evolução do coeficiente de pressão ao longo da superfície do cilindro, apresenta-se apenas a curva correspondente à velocidade angular padrão da plataforma aérea (60RPM), evitando a sobreposição de curvas e melhorando a sua percepção.



**Figura 5.16 – Variação do coeficiente de pressão ao longo da superfície do cilindro.**

Perante a Figura 5.16, o coeficiente de pressão inicia-se em zero, pois a pressão nesse ponto, à superfície do cilindro, é igual à pressão do escoamento não perturbado. Depois a pressão começa a diminuir, visto que, corresponde à zona superior do cilindro, onde a velocidade do escoamento aumenta. Aproximadamente em  $\beta = 205^\circ$  (zona inferior do cilindro) a pressão na superfície do cilindro atinge o seu valor máximo e a velocidade do escoamento

diminui para zero (ponto de estagnação). A partir de  $\beta = 300^\circ$  até  $\beta = 360^\circ$ , a pressão à superfície do cilindro volta a ser igual à pressão do escoamento não perturbado (zona onde ocorre a formação da esteira). Esta evolução pode ser acompanhada pela Figura 5.15 ( $TSR = 3$ ) e pela equação de *Bernoulli*.

As forças de arrasto e as forças de sustentação associadas a cada simulação, seguem-se na Tabela 5.15. Tal como no caso anterior, as forças aerodinâmicas são calculadas tendo em conta o comprimento do cilindro correspondente a 1m.

**Tabela 5.15 – Apresentação das forças de arrasto e de sustentação obtidas neste trabalho.**

Simulação	Velocidade Angular do Cilindro, $\omega$ , [RPM]	Força de Arrasto Média, $\overline{F}_D$ , [N]	Força de Sustentação Média, $\overline{F}_L$ , [N]	Tempo de Simulação [horas]
3	30	18	386	20
4	40	20	458	20
5	50	24	519	20
6	60	30	603	20

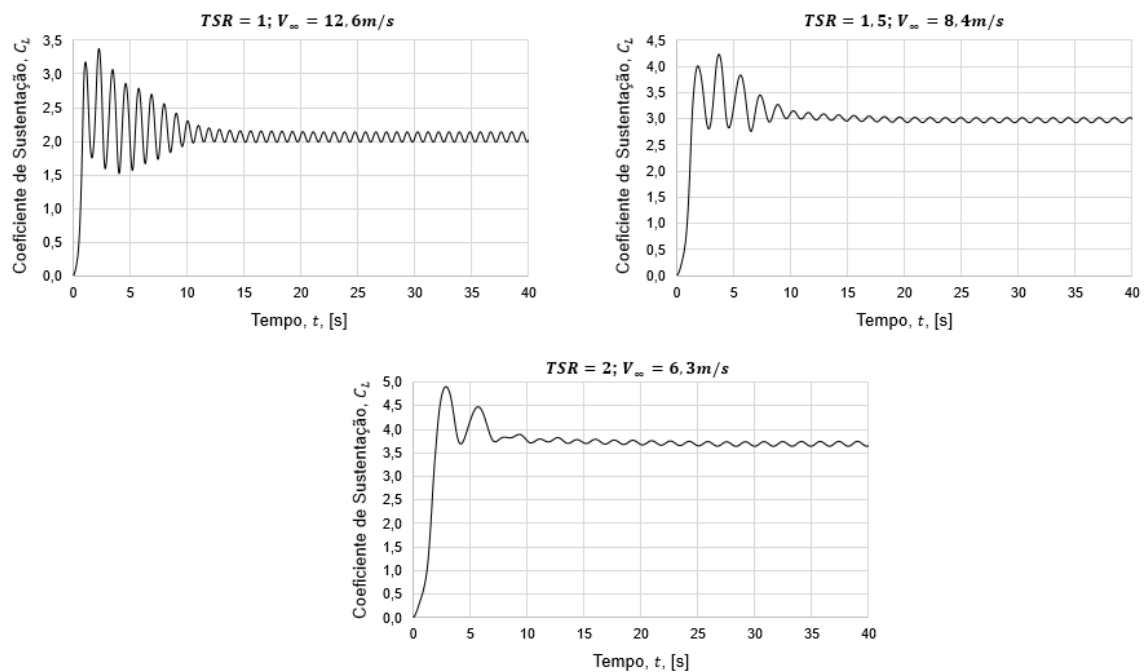
Contextualizando para o projeto da *Omnidea*, perante a Tabela 5.15, conclui-se que para uma mesma velocidade de vento ( $V_\infty = 4m/s$ ), tanto a força de arrasto como a força de sustentação aumentam com a velocidade angular do cilindro. Logo, durante a fase de descolagem da plataforma aérea convém que o balão adquira uma velocidade angular de 60RPM ao invés de 30RPM, 40RPM ou 50RPM, visto que, assim consegue obter uma maior elevação até atingir a altitude desejada. Por outro lado, quando se realizar a fase de aterragem, de maneira a diminuir a força de sustentação do balão, convém que este diminua a velocidade angular, assim a força que os cabos têm que exercer para recolher a plataforma aérea é menor. De salientar que até certo instante, não se deve reduzir completamente a velocidade angular do balão (0RPM), porque, tal como se constatou anteriormente, apesar de se anular a força de sustentação, ocorre um aumento da turbulência e da instabilidade da plataforma aérea, complicando a fase de aterragem.

De seguida é feita a análise dos resultados obtidos nas simulações numéricas 7, 8 e 9. Estas simulações têm como objetivo ajudar a perceber a influência da velocidade do vento no coeficiente de arrasto e no coeficiente de sustentação do balão. Como a velocidade do vento varia de simulação para simulação, o número de *Reynolds* também varia, tal como é perceptível na Tabela 5.16.

**Tabela 5.16 – Características das últimas três simulações referentes ao escoamento em torno do cilindro em rotação.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_\infty$ , [m/s]	Velocidade Angular do Balão, $\omega$ , [rad/s]		TSR	Número de Reynolds, $Re$
		[rad/s]	[RPM]		
7	6,3	6,28	60	2	$1,7 \times 10^6$
8	8,4			1,5	$2,2 \times 10^6$
9	12,6			1	$3,4 \times 10^6$

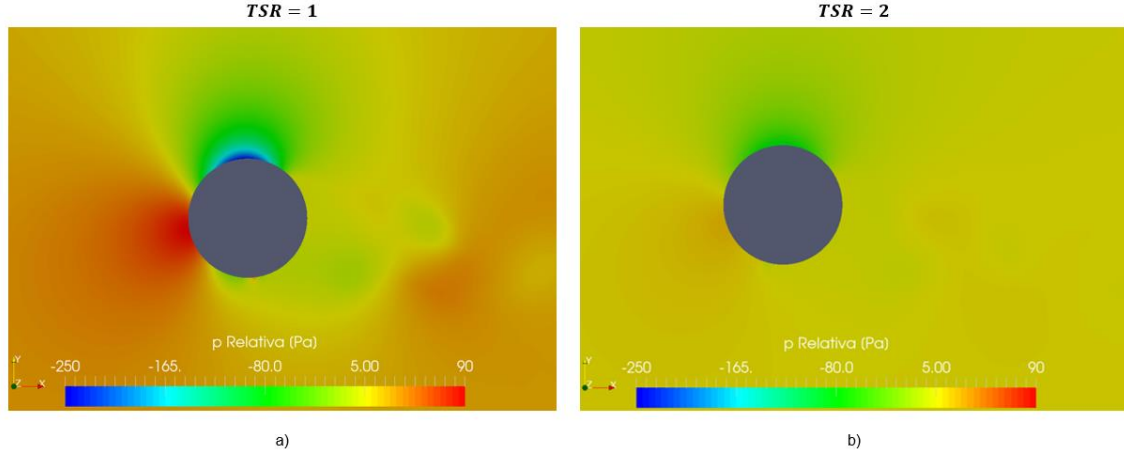
Assim, na Figura 5.17 surge a evolução do coeficiente de sustentação,  $C_L$ , ao longo do tempo de simulação para vários valores de  $TSR$ .



**Figura 5.17 – Evolução do coeficiente de sustentação para vários valores de  $TSR$ .**

Através da Figura 5.17, verifica-se que o coeficiente de sustentação aumenta com o  $TSR$ , ou seja, quanto maior é a velocidade de vento, menor é o coeficiente de sustentação.

Para justificar o facto de o coeficiente de sustentação diminuir com o aumento da velocidade do escoamento não perturbado, não basta apenas ter em conta a diferença de pressões entre a zona superior e inferior do cilindro, pois a velocidade do escoamento não perturbado varia de simulação para simulação. Desse modo, é apresentado na Figura 5.18-a) e na Figura 5.18-b), onde surge a variação de pressão do escoamento junto à superfície do cilindro referente ao último passo de tempo das simulações 9 e 7, respetivamente.



**Figura 5.18 – Intensidade da pressão relativa do escoamento para diferentes valores de  $TSR$ .**

Como se pode constatar pela Figura 5.18, a diferença de pressões entre a zona superior e inferior do cilindro é maior na Figura 5.18-a) ( $TSR = 1$ ;  $V_\infty = 12,6 \text{ m/s}$ ;  $\Delta p = 335,5 \text{ Pa}$ ) comparativamente à Figura 5.18-b) ( $TSR = 2$ ;  $V_\infty = 6,3 \text{ m/s}$ ;  $\Delta p = 111 \text{ Pa}$ ). Tal como referido anteriormente, a força de sustentação aumenta à medida que a diferença de pressões entre a zona superior e inferior do cilindro é maior. Por outro lado, verifica-se que:

$$\frac{\Delta p_{(TSR=1)}}{\Delta p_{(TSR=2)}} < \frac{V_{(TSR=1)}^2}{V_{(TSR=2)}^2} \Leftrightarrow \frac{\Delta p_{(TSR=1)}}{\Delta p_{(TSR=2)}} < 4 \quad (5.7)$$

Sabe-se também que:

$$\frac{\Delta p_{(TSR=1)}}{\Delta p_{(TSR=2)}} > 1 \quad (5.8)$$

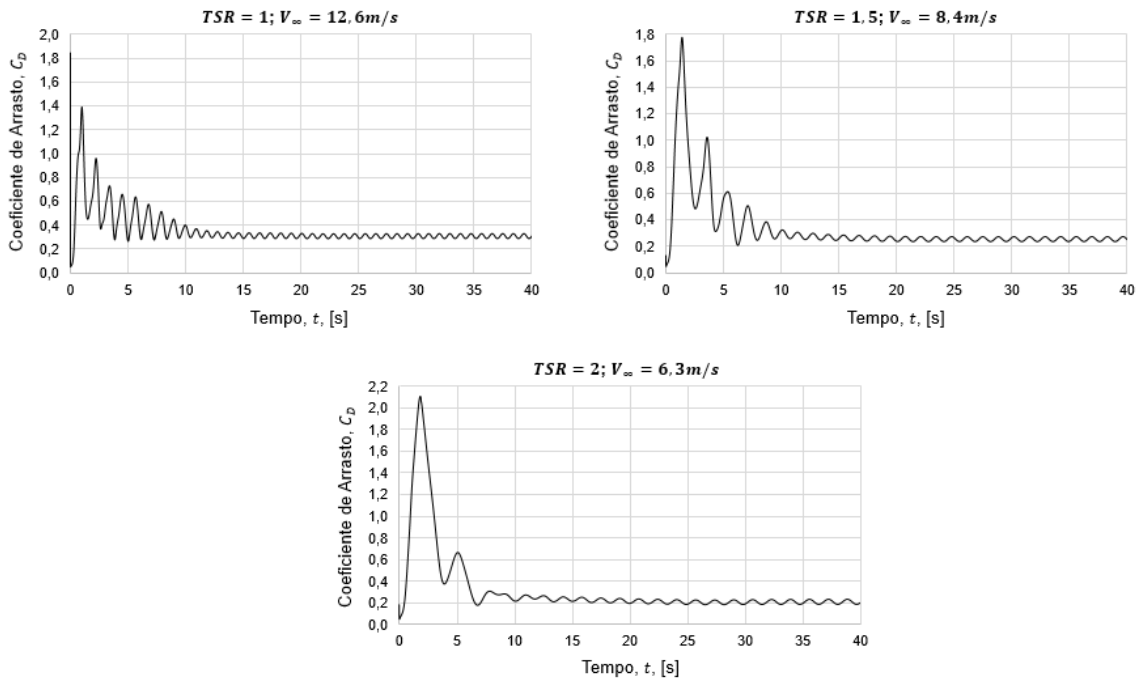
Então, combinando as equações (5.7) e (5.8) resulta:

$$\begin{aligned} 1 < \frac{\Delta p_{(TSR=1)}}{\Delta p_{(TSR=2)}} < 4 &\Leftrightarrow 1 < \frac{F_{L(TSR=1)}}{F_{L(TSR=2)}} < 4 \Leftrightarrow 1 < \frac{(0,5C_L\rho AV_\infty^2)_{(TSR=1)}}{(0,5C_L\rho AV_\infty^2)_{(TSR=2)}} < 4 \\ &\Leftrightarrow 1 < \frac{(C_L V_\infty^2)_{(TSR=1)}}{(C_L V_\infty^2)_{(TSR=2)}} < 4 \Leftrightarrow 1 < \frac{(C_L)_{(TSR=1)}}{(C_L)_{(TSR=2)}} 4 < 4 \Leftrightarrow \frac{1}{4} < \frac{(C_L)_{(TSR=1)}}{(C_L)_{(TSR=2)}} < 1 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Posto isto, conclui-se que  $C_{L(V_\infty=12,6 \text{ m/s})} < C_{L(V_\infty=6,3 \text{ m/s})}$ . Para além disso, conclui-se também que  $C_{L(V_\infty=12,6 \text{ m/s})} > C_{L(V_\infty=6,3 \text{ m/s})}/4$ .

Embora o coeficiente de sustentação diminua com o aumento da velocidade do escoamento não perturbado, a respetiva força de sustentação aumenta, pois esta é proporcional ao quadrado da velocidade do vento. Pelo que, é possível validar as duas equações do efeito *Magnus*, isto é, a força de sustentação criada por esse efeito é proporcional à velocidade angular do cilindro e à velocidade do escoamento não perturbado.

Agora é apresentada na Figura 5.19, a evolução do coeficiente de arrasto,  $C_D$  ao longo do tempo de simulação para vários valores de  $TSR$ .



**Figura 5.19 – Evolução do coeficiente de arrasto para vários valores de  $TSR$ .**

Relativamente ao coeficiente de arrasto, observando a Figura 5.19, conclui-se que este diminui à medida que o  $TSR$  aumenta, ou seja, quanto menor for a velocidade do escoamento não perturbado, menor é o coeficiente de arrasto. No entanto, a força de arrasto é proporcional ao quadrado da velocidade do vento, aumentando a resistência do cilindro ao escoamento.

Na Tabela 5.17, segue-se a apresentação dos valores médios dos coeficientes e forças aerodinâmicas após se atingir a estabilização das simulações. As forças são calculadas para um comprimento de cilindro de 1m.

**Tabela 5.17 – Apresentação dos coeficientes e forças aerodinâmicas em cada simulação.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_\infty$ , [m/s]	$TSR$	Coeficientes Aerodinâmicos		Forças Aerodinâmicas, [N]		Tempo de Simulação [horas]
			$\overline{C_L}$	$\overline{C_D}$	$\overline{F_L}$	$\overline{F_D}$	
7	6,3	2	3,7	0,21	1100	62	20
8	8,4	1,5	3	0,26	1585	137	20
9	12,6	1	2	0,31	2394	371	20

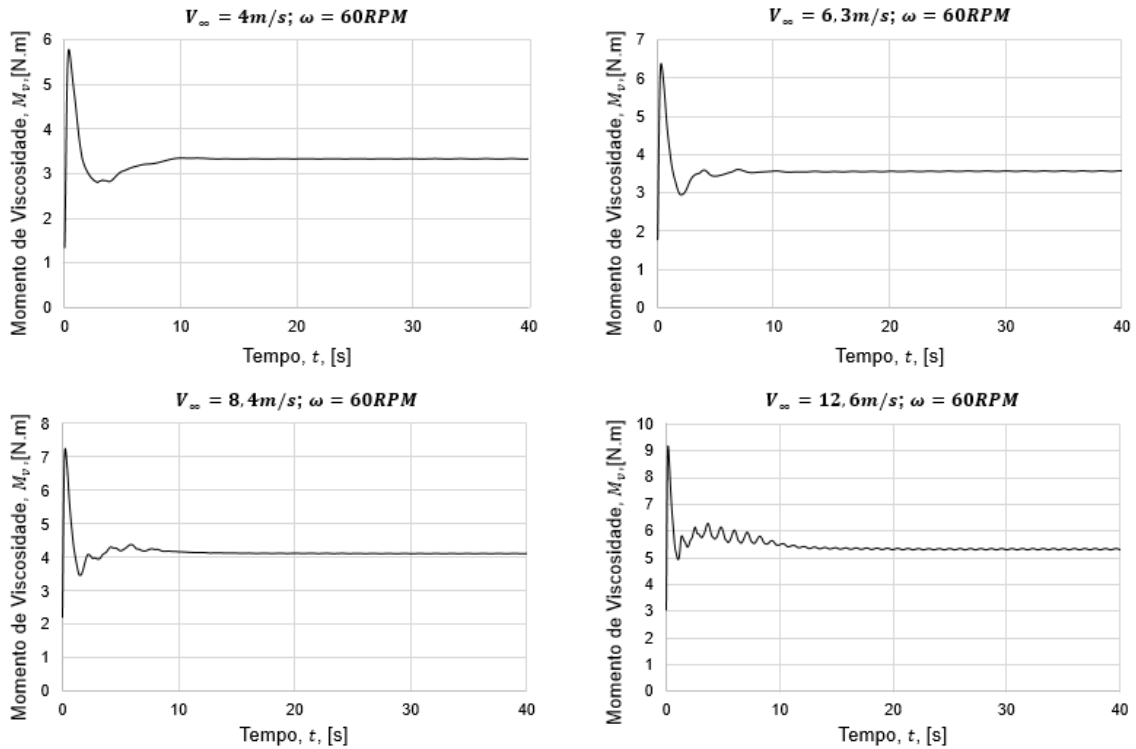
Analisando a Tabela 5.17, verifica-se que as forças aerodinâmicas aumentam com a velocidade do escoamento não perturbado. Como se viu anteriormente, a intensidade da velocidade média do vento aumenta com a altitude, logo a plataforma aérea ganha uma maior força de sustentação e de arrasto à medida que vai ganhando altitude.

De modo a determinar a potência média necessária para colocar o cilindro em rotação,  $\bar{P}_{cilindro}$ , com uma velocidade angular padrão de 60RPM é preciso ter em conta o seu momento devido às forças viscosas. Assim, na Figura 5.20, surge o momento devido às forças viscosas do cilindro para diferentes velocidades de escoamento não perturbado.

De salientar que  $\bar{P}_{cilindro}$  é dado pela seguinte equação:

$$\bar{P}_{cilindro} = \bar{B}\omega \Leftrightarrow \bar{P}_{cilindro} = \overline{M_v}\omega \quad (5.10)$$

onde  $\overline{M_v}$  simboliza o momento devido às forças viscosas médio.



**Figura 5.20 – Momento devido às forças viscosas do cilindro para várias velocidades de vento.**

Como se pode observar pela Figura 5.20, o momento devido às forças viscosas médio aumenta com a velocidade do escoamento não perturbado. Este momento médio é proporcional às forças viscosas e estas são proporcionais às tensões de atrito viscosas. Finalmente, as tensões de atrito viscosas são também proporcionais ao gradiente de velocidade do escoamento. Quanto maior é a velocidade do escoamento não perturbado maior é esse gradiente de velocidade. Para além disso, na Tabela 5.18, é possível visualizar também a potência necessária que o motor tem que fornecer ao cilindro para que este efetue o movimento de rotação. De notar, que os resultados da Figura 5.20 têm em conta o comprimento de 1m do cilindro, logo a potência necessária a fornecer ao cilindro também.



**Tabela 5.18 – Apresentação do momento devido às forças viscosas médio e da potência média necessária a fornecer ao cilindro.**

<b>Simulação</b>	<b>Velocidade do Escoamento não Perturbado, <math>V_{\infty}</math>, [m/s]</b>	<b>Momento devido às Forças Viscosas Médio, <math>\overline{M}_v</math>, [N.m]</b>	<b>Potência Média Necessária a Fornecer ao Cilindro, <math>\overline{P}_{cilindro}</math>, [W]</b>
3	4	3,3	21
7	6,3	3,6	23
8	8,4	4,1	26
9	12,6	5,3	33

De acordo com os resultados numéricos da Tabela 5.18, como o momento devido às forças viscosas médio é proporcional à velocidade do vento, a potência necessária a fornecer ao cilindro para que tenha uma rotação de 60RPM é também proporcional à velocidade do vento. Estes resultados poderão ser comparados durante os ensaios experimentais que a *Omnidea* pode, eventualmente, vir a realizar.



## 6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CASO DA TURBINA

No presente capítulo realiza-se, numa primeira aproximação, as simulações numéricas relativas ao caso da turbina *Darrieus* rotor-H. Pretende-se simular, simplificada, o conceito das duas famílias de configurações A e B apresentadas no capítulo 3. Assim, é possível analisar, essencialmente, o comportamento do escoamento ao longo dos respetivos modelos para a nova plataforma aérea, determinar o coeficiente de potência e estudar a influência da ação da turbina no efeito *Magnus* do balão.

O caso da turbina, tal como apresentado na Figura 6.1, divide-se em dois casos de estudo: escoamento em torno das pás de uma turbina *Darrieus* rotor-H e escoamento em torno das pás de uma turbina *Darrieus* rotor-H com um cilindro em rotação.

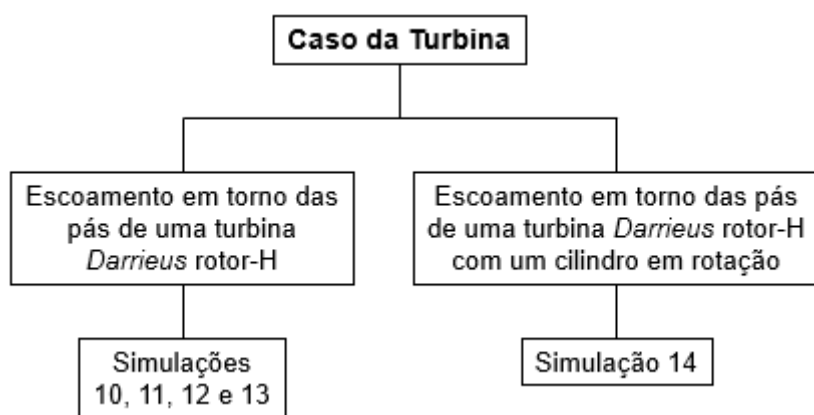


Figura 6.1 – Representação esquemática das simulações que se destinam a cada caso de estudo.

De seguida, surge na Tabela 6.1, as características das simulações que correspondem ao caso da turbina e completam a informação da Figura 6.1.

Tabela 6.1 – Características das simulações para o caso da turbina.

Simulações	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_{\infty}$ , [m/s]	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]	$TSR$	Velocidade Angular da Turbina, $\omega$	
				[rad/s]	[RPM]
10	8,4	4	1,5	6,28	60
11	6,3		2		
12	4,2		3		
13	3,1		4		
14	6,3	8	4	6,28	60

Como visto anteriormente, o intervalo de valores entre  $1,5 \leq TSR \leq 5$  é onde se encontram no mínimo cerca de 70% das velocidades de vento registadas no local de operação da turbina. Logo, faz sentido simular os casos de estudo dentro desse intervalo de funcionamento. A justificação pela qual se opta por estes dois diâmetros é com o objetivo da

família de configurações A possuir o mesmo diâmetro de cada balão e a família de configurações B possuir o dobro do diâmetro.

## 6.1 Geração da Malha e Limites dos Domínios

Finalizada a introdução ao problema, é necessário definir alguns parâmetros da simulação. Como referência base, utiliza-se um código *OpenFOAM* que está disponível na plataforma online *GitHub*, cujo autor está referenciado em [41]. Posteriormente, são feitas alterações de modo a simular o problema desejado.

Durante o capítulo 3 são analisados alguns parâmetros de funcionamento da turbina *Darrieus*, tendo em conta a maximização do seu coeficiente de potência ao longo do intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$ . Agora, servem como *inputs* para as próximas simulações. Na Tabela 6.2 estão representados esses parâmetros e as respetivas designações. De notar que o comprimento das pás da turbina é 1m, pois tal como no caso do cilindro, simplifica-se a análise efetuada durante a fase de pós-processamento.

**Tabela 6.2 – Parâmetros das pás da turbina *Darrieus* rotor-H.**

Parâmetros das Pás	Designação
Perfil da Pá	NACA 0015
Solidez	0,5
Número de Pás	3
Raio da Configuração A [m]	2
Raio da Configuração B [m]	4
Corda da Configuração A [m]	0,3
Corda da Configuração B [m]	0,7

No caso da turbina, o escoamento é bidimensional, transitório e isotérmico. Relativamente ao regime de turbulência, como apresentado anteriormente pela equação (2.15), o número de *Reynolds* local para uma das pás varia ao longo da rotação da turbina. Para além disso, também é proporcional ao comprimento de corda da pá. Posto isto, é apresentado na Figura 6.2 e na Figura 6.3, para cada caso de estudo, a variação do número de Reynolds local para uma das pás ao longo da rotação da turbina. Considera-se que a velocidade angular da turbina é igual à velocidade angular padrão do atual modelo genérico da plataforma aérea, 60RPM.

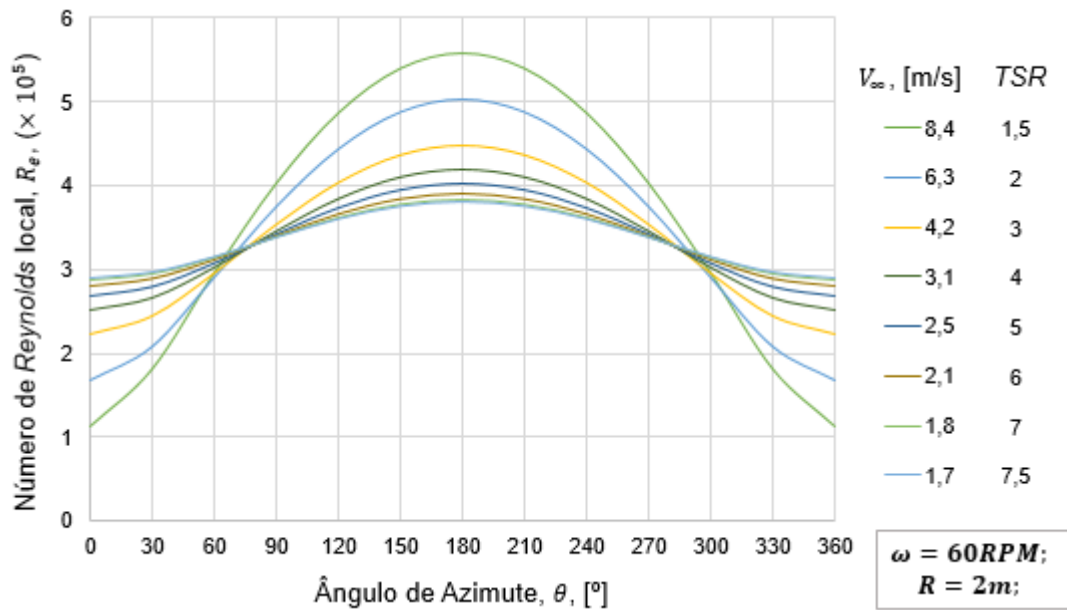


Figura 6.2 – Variação do número de *Reynolds* local de uma das pás ao longo da rotação da turbina.

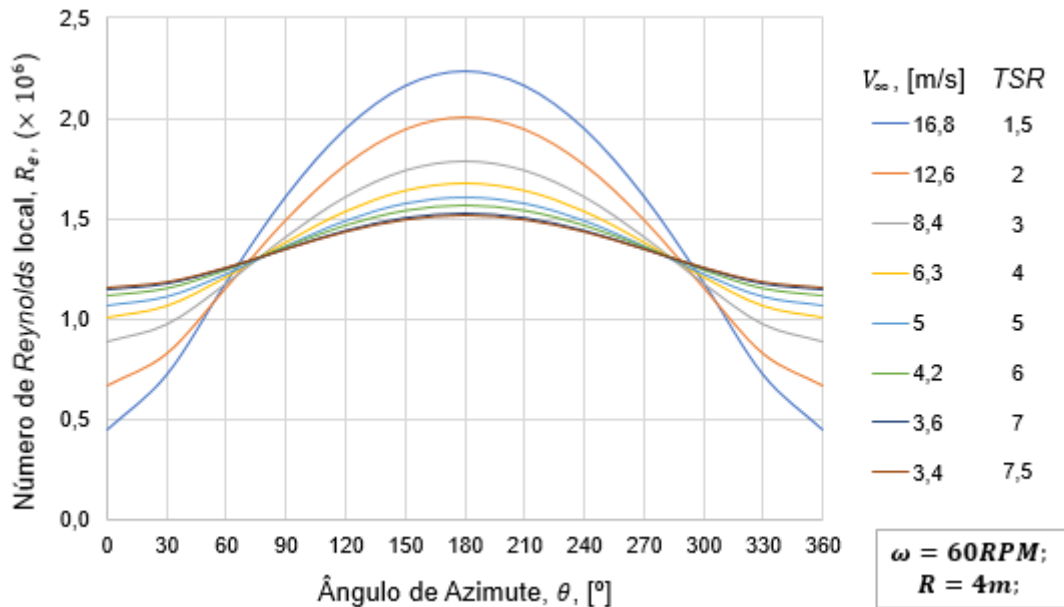


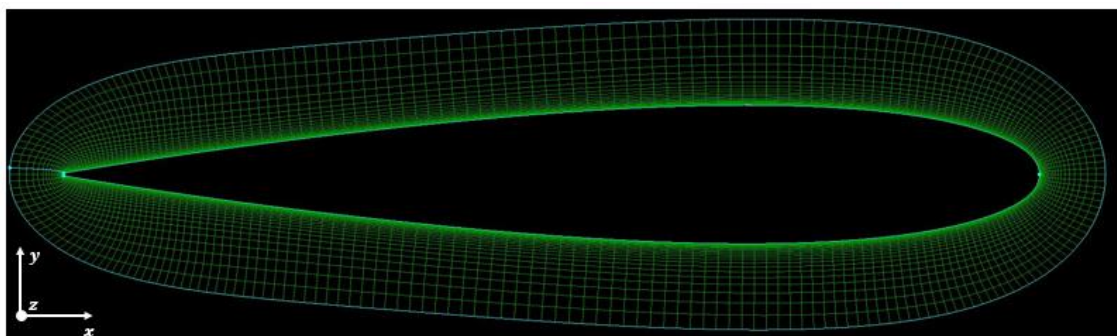
Figura 6.3 – Variação do número de *Reynolds* local de uma das pás ao longo da rotação da turbina.

Segundo a Figura 6.2 e a Figura 6.3, observa-se que o número de *Reynolds* local para uma das pás da turbina evolui de uma forma muito característica. Repare-se que ao longo da rotação da pá, independentemente da velocidade do escoamento, o número de *Reynolds* local atinge um valor máximo na posição  $\theta = 180^\circ$ , ou seja, quando a pá está alinhada com a direção e sentido do escoamento (tomando como exemplo os dados da Figura 2.8) que, por conseguinte, corresponde à posição em que a velocidade relativa é máxima, como se pode ver na Figura 2.11. Em contrapartida, atinge um valor mínimo na posição  $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 360^\circ$  (mesma posição) que corresponde à situação em que pá tem a mesma direção do escoamento, mas sentido contrário, ou seja, quando a velocidade relativa é mínima. Por outro

lado, constata-se que quanto maior é a velocidade do escoamento, maior é a variação do número de *Reynolds* local da posição  $\theta = 180^\circ$  para a posição  $\theta = 0^\circ$  ou  $\theta = 360^\circ$ . No entanto, repare-se ainda que a variação do número de *Reynolds* local a partir de  $V_\infty \leq 6,3 \text{ m/s}$  é relativamente pouca quando comparada para valores a partir de  $V_\infty \geq 8,4 \text{ m/s}$ . Apesar das variações constantes do número de *Reynolds* local, o escoamento está sempre em regime turbulento.

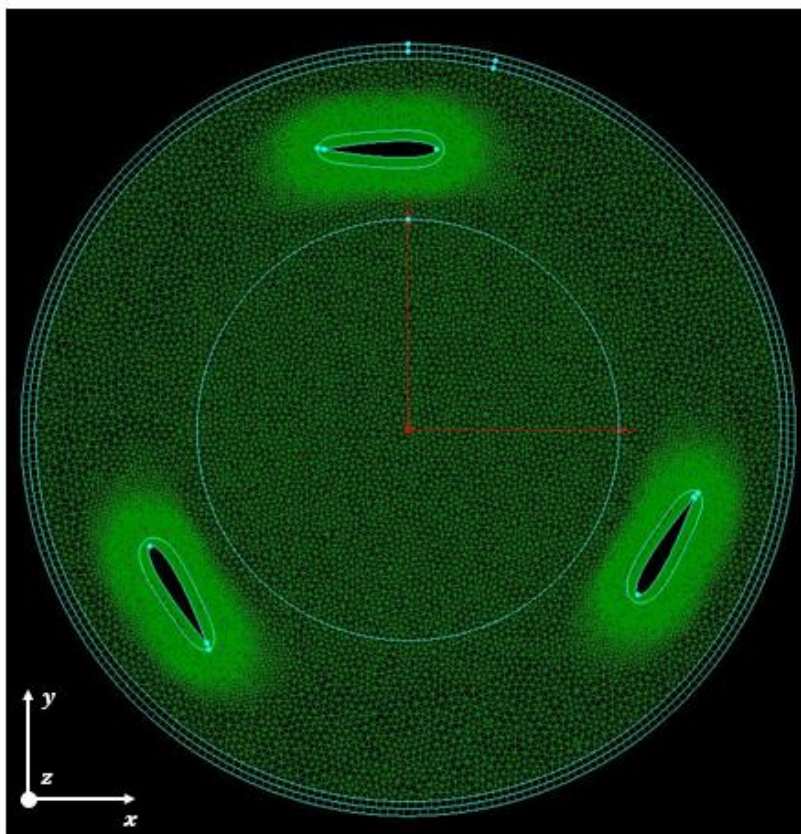
No presente caso, devido à complexidade do problema, utiliza-se um programa mais elaborado para a criação da malha. O programa *Pointwise* possui interface gráfico o que permite ao utilizador visualizar a malha à medida que a vai construindo. Através do código obtido por [41] é possível introduzir no programa as dimensões das pás e as características da malha em torno das suas superfícies. Entre elas, a altura da célula inicial, o rácio de crescimento da célula e o número de pontos de discretização. Assim, de acordo com a Tabela 6.2, são introduzidos os *inputs* no código de modo a criar o caso que se pretende. Junto às superfícies das pás são onde ocorrem as maiores variações de pressão e velocidade do escoamento ao longo da simulação, por isso, é fundamental essa zona estar bem refinada de modo a obter resultados com uma maior precisão.

Primeiramente, é apresentado o domínio computacional para o primeiro caso de estudo (simulação apenas com as pás da turbina) e, posteriormente, para o segundo caso. Assim, na Figura 6.4 está presente a geometria de uma das pás da turbina *Darrieus* e a malha gerada à volta da sua superfície.



**Figura 6.4 – Geometria do perfil de uma das pás e a malha à sua superfície.**

Depois da geração da pá e da respetiva malha, abdica-se do código obtido pela plataforma *online GitHub* [41] e opta-se por criar o restante domínio com a geometria e estrutura adequadas ao problema em questão. Agora é necessário criar o domínio que garanta o movimento de rotação das pás. Na Figura 6.5 está representado esse domínio.



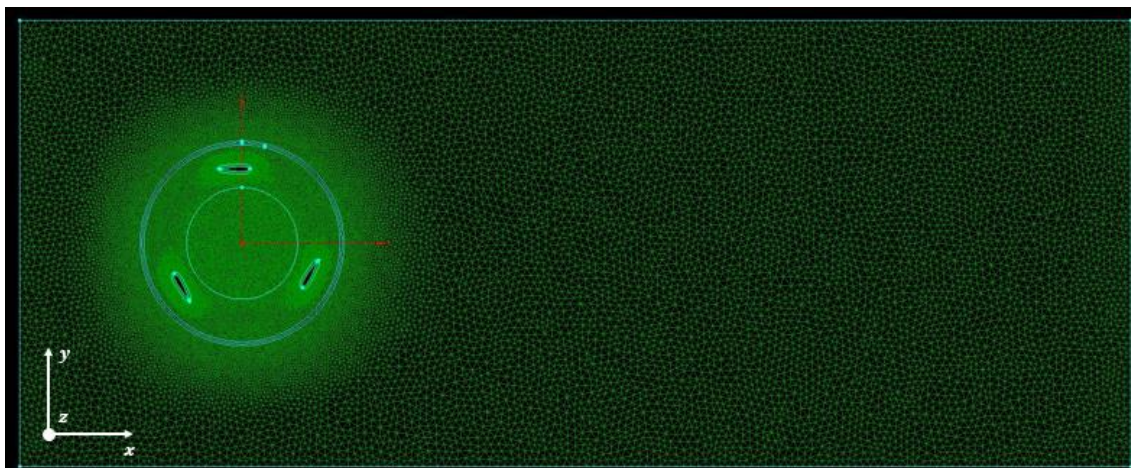
**Figura 6.5 – Geometria do domínio que possui movimento de rotação.**

Repare-se através da Figura 6.5, que as pás rodam no sentido horário, visto que, o escoamento incide segundo o eixo positivo do eixo do  $x$ , desse modo, a força de sustentação resulta, maioritariamente, segundo o sentido positivo do eixo do  $y$ , assim permite à plataforma aérea atingir a altitude desejada.

Nas zonas adjacentes às pás, há um maior número de células com o intuito de acompanhar a libertação de vórtices e as variações de pressão e de velocidade do escoamento.

Ao longo da simulação é expectável que se crie uma esteira após a passagem do escoamento em torno das pás, então é necessário criar uma malha, desta vez com uma geometria retangular, para acompanhar essa evolução. Na Figura 6.6, está representado esse domínio.

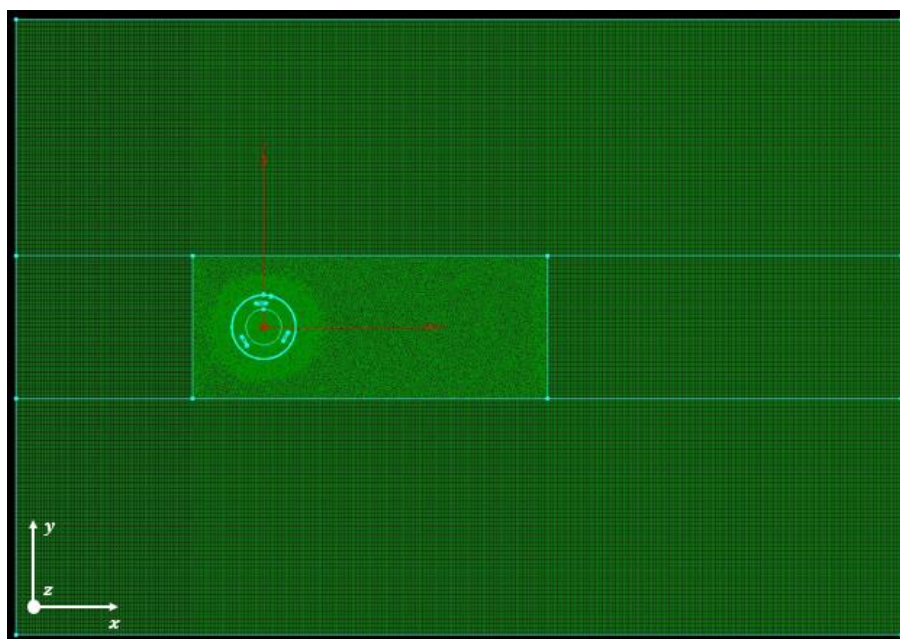




**Figura 6.6 – Domínio retangular.**

Este domínio retangular encontra-se imóvel, apenas o domínio circular, no seu interior, possui movimento de rotação. Na fronteira do domínio circular a malha é mais refinada de modo a haver uma transição gradual do tamanho de cada célula presente no domínio circular para o domínio retangular. Por outro lado, nessa fronteira a malha é mais refinada devido à proximidade das pás, resultando, como referido anteriormente, numa maior variação das propriedades do escoamento.

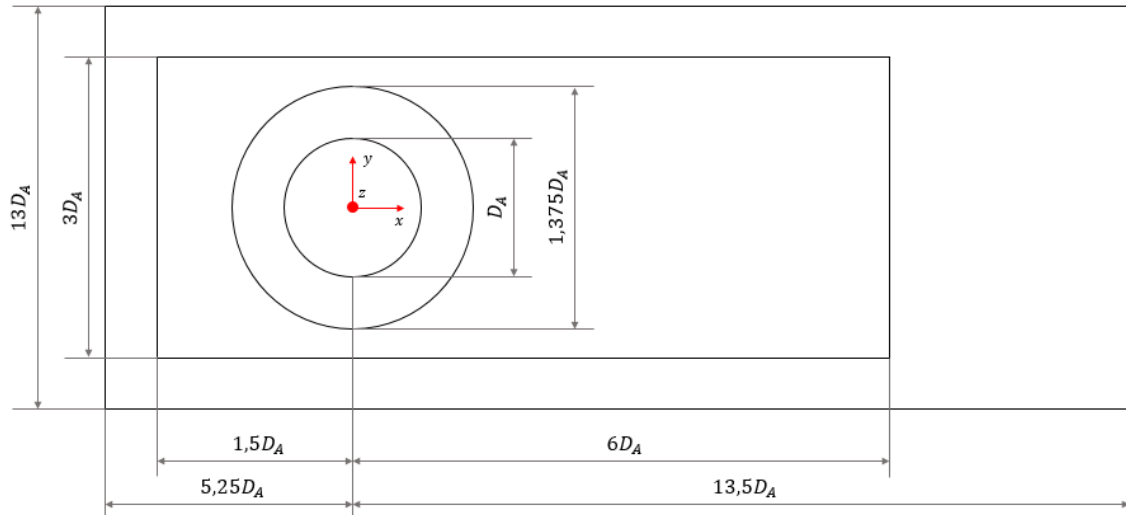
Neste momento resta apenas apresentar, na Figura 6.7, o domínio computacional que envolve todos os domínios apresentados em cima, destacando uma ideia geral de toda a malha que é simulada.



**Figura 6.7 – Apresentação de todos os domínios da simulação.**

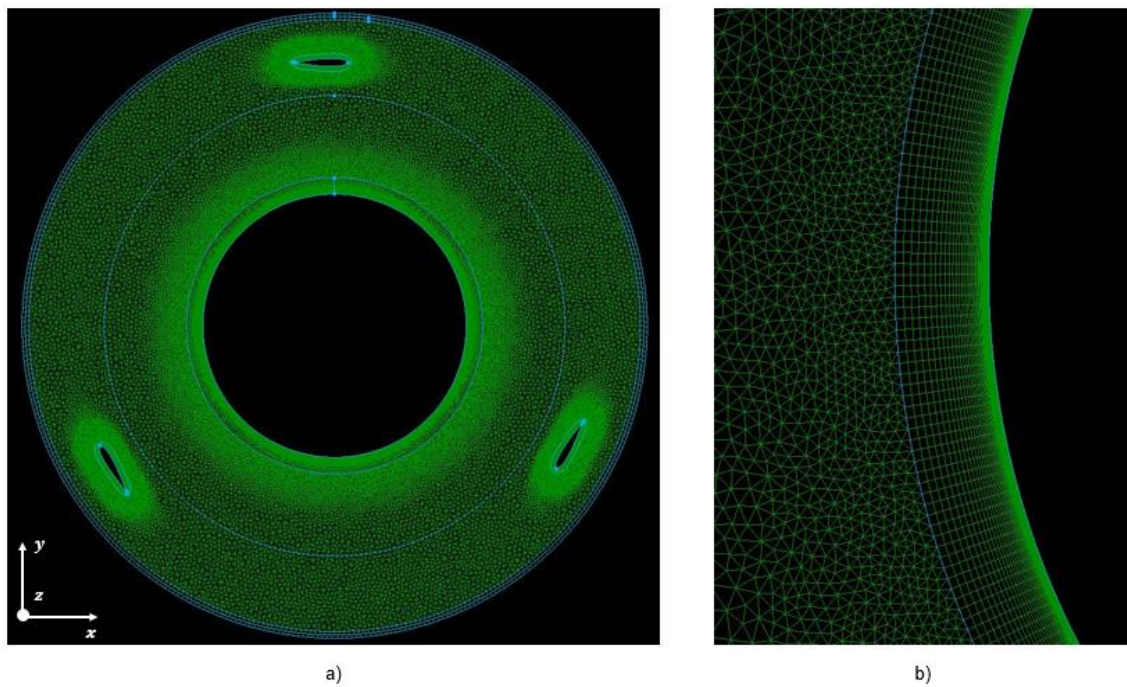


Para uma melhor compreensão das dimensões de todos os domínios referentes ao primeiro caso de estudo, é apresentado a Figura 6.8, sendo  $D_A = 4u.c$  (unidade de comprimento) o diâmetro da turbina que corresponde à configuração A.



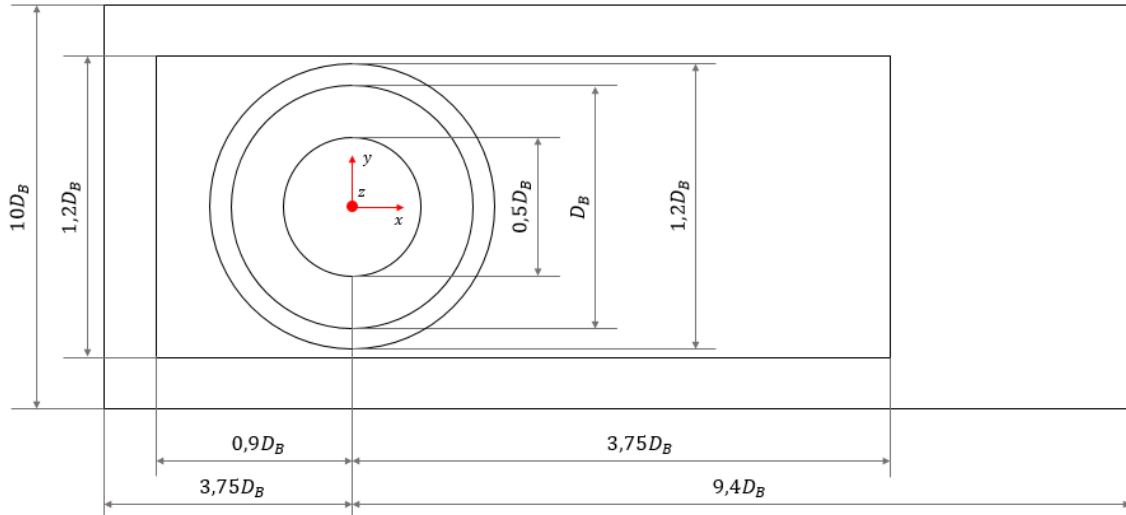
**Figura 6.8 – Proporções de todos os domínios da simulação do primeiro caso de estudo.**

Apresentada a malha e as respetivas dimensões para o primeiro caso de estudo, segue-se a apresentação das duas diferenças que constam na malha para o segundo caso, representada na Figura 6.9: o diâmetro da turbina e o cilindro que se encontrará em rotação.



**Figura 6.9 – a) Perspetiva do domínio que possui movimento de rotação; pormenor da camada limite junto à superfície do cilindro b).**

De seguida, na Figura 6.10, são apresentadas as dimensões de todo o domínio computacional do segundo caso de estudo. Sendo  $D_B = 8u.c$  o diâmetro da turbina correspondente à configuração B.



**Figura 6.10 – Proporções de todos os domínios da simulação do segundo caso de estudo.**

Após a conversão dos dois domínios computacionais do *Pointwise* para o *OpenFOAM* e, agrupada cada informação em vários ficheiros em formato de texto, são definidos os limites dos domínios que resultam da geração das malhas. A estes limites é necessário definir os tipos de condição de fronteira do problema, onde estão representadas na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3 – Tipos de condições de fronteira atribuídas aos limites dos domínios no caso da turbina.**

Limites dos Domínios	Descrição	Tipo de Condição de Fronteira
<i>blade1</i>	Pá n <sup>o</sup> 1.	<i>wall</i>
<i>blade2</i>	Pá n <sup>o</sup> 2.	
<i>blade3</i>	Pá n <sup>o</sup> 3.	
<i>cylinder*</i>	Superfície cilíndrica.	
<i>farfield</i>	Domínio computacional.	<i>patch</i>
<i>ext_interface</i> e <i>int_interface</i>	Separação entre a malha imóvel e a malha móvel.	<i>cyclicAMI</i>
<i>sides</i>	Domínios projetados segundo o eixo z.	<i>empty</i>

\*A superfície cilíndrica é apenas imposta no segundo caso de estudo da turbina.

O tipo de condições de fronteira *wall*, *patch* e *empty* já foram definidas anteriormente para o caso do cilindro. A condição de fronteira *cyclicAMI* é atribuída aos domínios da solução identificados por *ext\_interface* e *int\_interface*. Estes domínios separam o domínio circular que possui um movimento de rotação do domínio retangular imóvel. A condição de fronteira *cyclicAMI* que é, particularmente, indicado para malhas em rotação, permite que duas zonas da malha não correspondentes estejam fisicamente ligadas por uma certa tolerância. A

comunicação entre os dois domínios da solução é realizada usando uma interpolação de interface de malha arbitrária (Arbitrary Mesh Interface, *AMI*).

## 6.2 Modelo de Turbulência, Condições de Fronteira e Iniciais

Como se constatou anteriormente, as equações *RANS* conseguem descrever, matematicamente, o efeito de turbulência presente no escoamento através da média temporal das equações de *Navier-Stokes*.

Apesar do modelo de turbulência para o caso da turbina também se basear nas equações *RANS*, este é diferente do modelo de turbulência usado no caso do cilindro. A razão pela qual isso se sucede, é devido à maior complexidade da malha e, principalmente, às constantes variações das propriedades do escoamento na camada limite das pás. Opta-se, então, por escolher um modelo de turbulência que utilize apenas uma equação de transporte para representar as propriedades de turbulência do escoamento, reduzindo, assim, o tempo de simulação. Por outro lado, pretende-se que este modelo de turbulência seja adequado para perfis alares, de modo a garantir alguma precisão e coerência nos resultados. Pretende-se ainda que o mesmo seja indicado para escoamentos incompressíveis.

Posto isto, é escolhido o modelo de turbulência *Spalart-Allmaras*. Este modelo é especialmente utilizado em aplicações aerospaciais, fornecendo bons resultados para camadas limite submetidas a grandes diferenças de pressão. Para além disso, tem a capacidade de efetuar uma transição suave de escoamento laminar para turbulento em zonas especificadas pelo utilizador [42].

A única equação utilizada pelo modelo de turbulência *Spalart-Allmaras* modela a produção, transporte e difusão da viscosidade cinemática turbulenta,  $\nu_t$ , e é dada pela seguinte equação:

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{\nu 1} \quad (6.1)$$

sendo que  $\tilde{\nu}$  corresponde a um modificador da viscosidade cinemática turbulenta. E  $f_{\nu 1}$  é uma função de encerramento que pode ser expressa por:

$$f_{\nu 1} = \frac{X^3}{X^3 + C_{\nu 1}^3} \quad (6.2)$$

$$X = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (6.3)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática do fluido e  $C_{\nu 1}$  é uma constante, cujo valor corresponde a 7,1 [43, 44].

Para este modelo de turbulência existe uma relação entre  $\tilde{v}$  e  $v$  consoante o tipo de condição de fronteira ou os limites dos domínios [45]:

- $\tilde{v}_{wall} = 0$ ;
- $3v < \tilde{v}_{farfield} < 5v$ ;
- $\tilde{v}_{ext\_interface} = \tilde{v}_{int\_interface} = \tilde{v}_{farfield}$ ;
- $\tilde{v}_{sides} = \text{empty}$ .

Posto isto, para este trabalho considera-se  $\tilde{v}_{farfield} = 4v$ , logo:

$$\tilde{v}_{farfield} = 4 \times 1,5 \times 10^{-5} = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.4)$$

Substituindo a equação (6.4) na equação (6.3) e, posteriormente, na equação (6.2):

$$f_{v1\ farfield} = 1,52 \times 10^{-1} \quad (6.5)$$

Por fim, resta determinar os valores da viscosidade cinemática turbulenta para os respetivos limites dos domínios que se apresentam na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4 – Apresentação dos valores das condições iniciais do modelo de turbulência para os vários limites dos domínios.**

Limites dos Domínios	Modificador da Viscosidade Turbulenta, $\tilde{v}$ , [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	Viscosidade Turbulenta, $v$ , [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
<i>wall</i>	0	0
<i>farfield</i>	$6 \times 10^{-5}$	$9,12 \times 10^{-6}$
<i>ext_interface e int_interface</i>		
<i>sides</i>	<i>empty</i>	<i>empty</i>

Note-se, que estes valores não dependem nem da velocidade do vento, nem do número de *Reynolds*, logo são constantes para todas as simulações.

Após a apresentação do modelo de turbulência, segue-se, na Tabela 6.5 a definição das restantes condições de fronteira para cada condição inicial. As condições iniciais, neste caso são a velocidade, a pressão e a equação de transporte do modelo de turbulência. No entanto, como se viu na descrição do mesmo, é necessário saber o valor do modificador da viscosidade cinemática turbulenta de modo a determinar a viscosidade cinemática turbulenta. Nesse sentido nas condições iniciais surge, adicionalmente, o termo do modificador.

Tabela 6.5 – Condições iniciais e respectivas condições de fronteira.

Condições iniciais	Propriedade do Escoamento	Limites dos Domínios	Condição de Fronteira	Descrição
<i>U</i>	Velocidade	<i>blade1</i>	<i>fixedValue</i>	A velocidade das pás toma um valor fixo, 0.
		<i>blade2</i>		
		<i>blade3</i>		
		<i>cylinder*</i>	<i>rotatingWallVelocity</i>	Junto às paredes do cilindro o fluido possui uma velocidade angular no sentido horário.
		<i>farfield</i>	<i>freestream</i>	A velocidade do vento toma um valor fixo em cada simulação.
		<i>ext_interface</i> <i>int_interface</i>	<i>cyclicAMI</i>	
		<i>sides</i>	<i>empty</i>	Condição para corpo bidimensional.
<i>P</i>	Pressão	<i>blade1</i>	<i>zeroGradient</i>	O gradiente de pressões 0.
		<i>blade2</i>		
		<i>blade3</i>		
		<i>cylinder*</i>		
		<i>farfield</i> <i>ext_interface</i> <i>int_interface</i>	<i>zeroGradient</i>	O gradiente de pressões no domínio é 0. É considerada pressão relativa.
		<i>sides</i>		Condição para corpo bidimensional.
		<i>sides</i>	<i>empty</i>	
<i>nut</i>	Viscosidade turbulenta	<i>blade1</i>	<i>fixedValue</i>	O ficheiro <i>nut</i> nas paredes é 0.
		<i>blade2</i>		
		<i>blade3</i>		
		<i>cylinder*</i>		
		<i>farfield</i> <i>ext_interface</i> <i>int_interface</i>	<i>cyclicAMI</i>	Valor calculado para todas as simulações.
		<i>sides</i>		Condição para corpo bidimensional.
		<i>sides</i>	<i>empty</i>	
<i>nuTilda</i>	Modificador da viscosidade turbulenta	<i>blade1</i>	<i>fixedValue</i>	O ficheiro <i>nut</i> nas paredes é 0.
		<i>blade2</i>		
		<i>blade3</i>		
		<i>cylinder*</i>		
		<i>farfield</i> <i>ext_interface</i> <i>int_interface</i>	<i>cyclicAMI</i>	Valor calculado para todas as simulações.
		<i>sides</i>		Condição para corpo bidimensional.
		<i>sides</i>	<i>empty</i>	

\*A superfície cilíndrica é apenas imposta no segundo caso de estudo da turbina.

As condições de fronteira impostas na Tabela 6.5 já são explicadas no caso do cilindro.

### 6.3 Outros Parâmetros da Simulação Numérica

De modo a completar a informação necessária para este caso, restam definir alguns parâmetros da simulação. Um deles está relacionado com o tempo de simulação. Na tabela Tabela 6.6, está descrita essa informação.

**Tabela 6.6 – Parâmetros da simulação numérica relativos ao tempo de simulação.**

Parâmetros	Valor			Descrição
<i>startTime</i>	0			Tempo inicial da simulação.
<i>endTime</i>	25	30 <sup>c</sup>	10 <sup>d</sup>	Cada simulação tem um número de iterações.
<i>writeInterval</i>	0,1			Passo de tempo com que o OF escreve as pastas de tempo.
<i>writeControl</i>	<i>adjustableRunTime</i>			Passo de tempo ajustável de acordo com o número máximo de <i>Courant</i> .
<i>maxCo</i>	20			Número máximo de <i>Courant</i> .

<sup>c</sup> Utilizado na simulação 13; <sup>d</sup> Utilizado na simulação 14.

No caso do cilindro, a geometria e os elementos da malha são relativamente simples e, por isso, permite que o utilizador escolha o passo de tempo que deseja (verificando o número de *Courant* durante a simulação) garantindo um tempo de simulação também relativamente curto. Neste caso, como os elementos da malha e a sua geometria apresentam um maior grau de complexidade, é necessário ajustar um número de *Courant*, de forma a rentabilizar o passo de tempo da simulação com a precisão dos resultados (de acordo com a equação 4.7). Como se verificou anteriormente, o número máximo de *Courant* deve ser inferior a 1, de maneira a garantir que os resultados convirjam para uma solução que seja o mais próximo possível da realidade. No entanto, ao longo do trabalho, tendo em conta as características da simulação, constatou-se que esse número máximo de *Courant* implica um tempo de simulação demasiado elevado, o que para uma primeira fase de estudo, tornaria este trabalho inconclusivo.

As bibliotecas e as funções que se utilizam no caso do cilindro, apresentadas na Tabela 5.7 e na Tabela 5.8, respetivamente, são as mesmas que se utilizam para este caso. No entanto, surge uma exceção na escolha das bibliotecas, apresentada na Tabela 6.7, e contém a informação necessária para resolver problemas associados a malhas móveis.

**Tabela 6.7 – Biblioteca adicional do OpenFOAM utilizada no caso da turbina.**

Biblioteca	Descrição
<i>libfvMotionSolvers.so</i>	Biblioteca do OF que contém a informação para resolver problemas de malha móvel.

Embora as funções sejam as mesmas, o momento devido às forças de pressão, neste caso manifesta-se de maneira diferente. Este deixa de ser zero (como acontecia no caso do cilindro), pois ao longo da rotação das pás, a direção do vetor da força de pressão não passa pelo centro de rotação da turbina, logo essa força tem um braço (raio de rotação das pás) que provoca o momento devido às forças de pressão segundo a componente  $z$ . No momento devido às forças viscosas a direção do vetor da força viscosa resultante também não passa pelo centro de rotação da turbina, tal como no caso do cilindro, no entanto, o braço da força neste caso é o raio da turbina.

Finalizando, resta apresentar a informação relativa à malha que tem movimento de rotação. É necessário indicar o eixo de rotação, o domínio que tem movimento de rotação, a velocidade angular, entre outros. Assim, na Tabela 6.8, surge essa informação.

**Tabela 6.8 – Parâmetros relativos à malha em rotação.**

Parâmetros	Valor	Descrição
<i>dynamicFvMesh</i>	-	Ferramenta do OF para problemas de malha móvel.
<i>solidBodyMotionFunction</i>	<i>cellZone</i>	Zona da malha que tem movimento de rotação.
	<i>origin</i> (0 0 0)	Origem do ponto de rotação.
	<i>axis</i> (0 0 1)	Eixo de rotação.
	<i>omega</i> (-6,28) [rad/s]	Velocidade angular.

## 6.4 Apresentação de Resultados

### 6.4.1 Escoamento em Torno das Pás da Turbina *Darrieus* Rotor-H

Relembrando as características das simulações destinadas a este caso, segue a Tabela 6.9 onde está presente essa informação.

**Tabela 6.9 – Características das simulações referentes ao escoamento em torno das pás da turbina.**

Simulações	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_{\infty}$ , [m/s]	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]	TSR	Velocidade Angular da Turbina, $\omega$	
				[rad/s]	[RPM]
10	8,4	4	1,5	6,28	60
11	6,3		2		
12	4,2		3		
13	3,1		4		

Findada a apresentação das características das simulações, segue-se a análise crítica dos resultados obtidos. Primeiramente, pretende-se determinar o coeficiente de potência médio da turbina,  $\overline{C_p}$ . Assim, perante a equação (2.3), o  $\overline{C_p}$  obtém-se através da seguinte equação:

$$\overline{C_p} = \frac{2\overline{P}_{turbina}}{A_v \rho V_\infty^3} \quad (6.7)$$

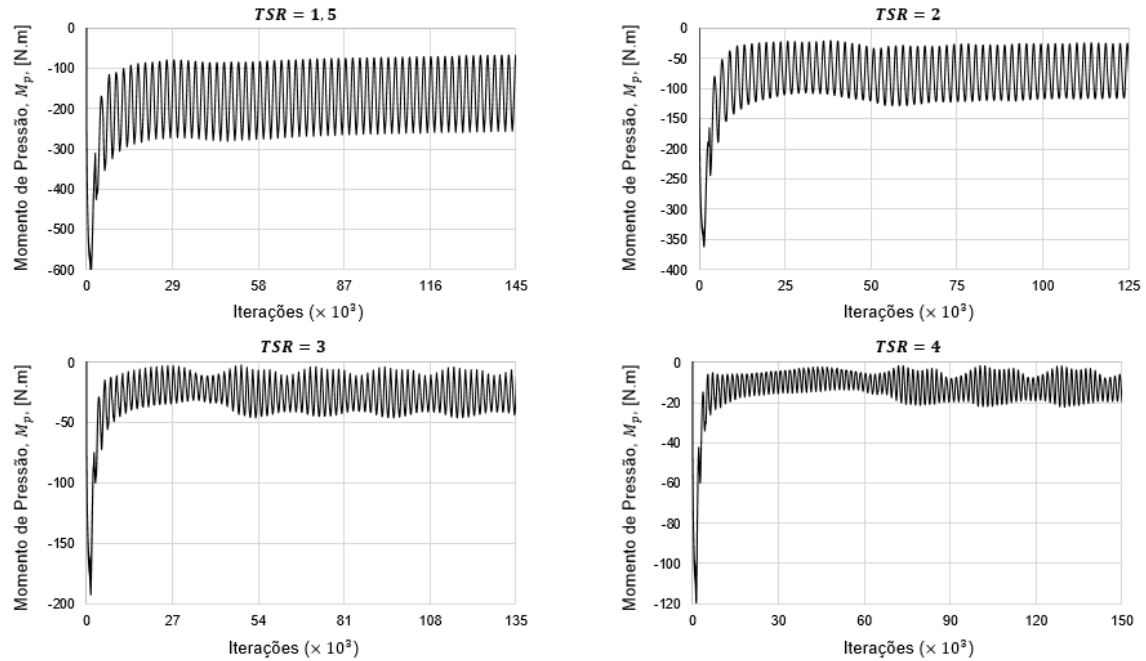
No entanto, como visto anteriormente pela equação (2.25), o  $\overline{C_p}$  pode ser obtido também por:

$$\overline{C_p} = \frac{2\overline{B}\omega}{A_v \rho V_\infty^3} \quad (6.8)$$

O binário médio,  $\overline{B}$ , pode ser calculado pela soma dos momentos médios provenientes das simulações: momento devido às forças de pressão e momento devido às forças viscosas do escoamento.

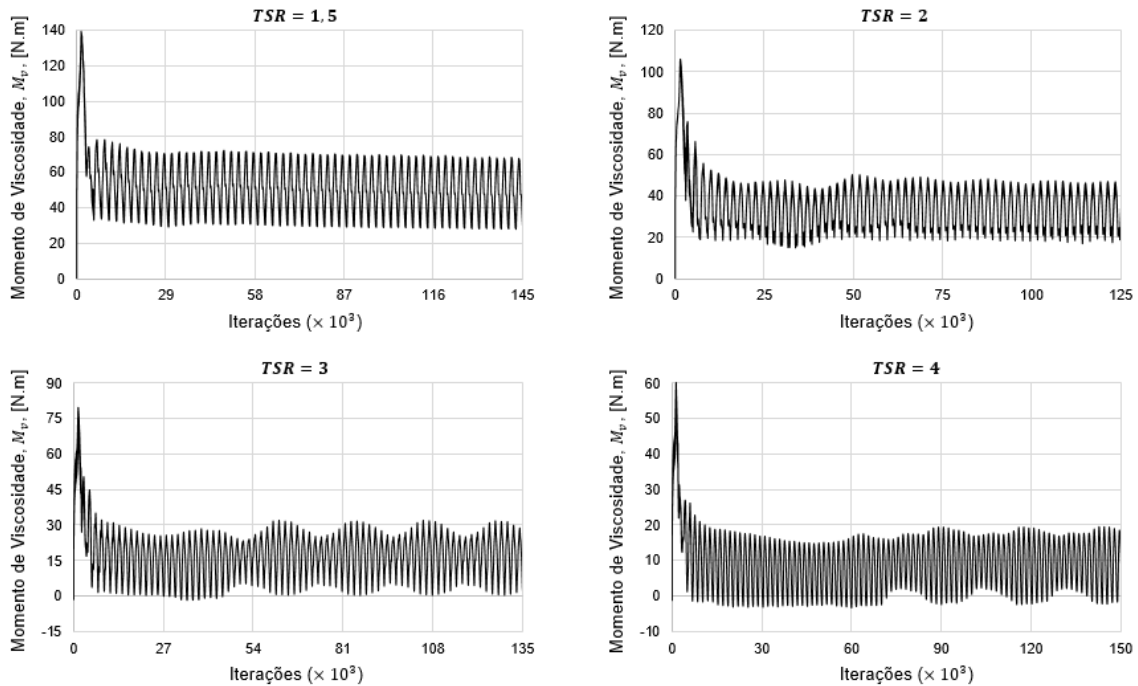
$$\overline{B} = \overline{M_p} + \overline{M_v} \quad (6.9)$$

Os somatórios dos momentos de pressão,  $M_p$ , são apresentados de seguida, na Figura 6.11 e, posteriormente, na Figura 6.12, são apresentados os momentos de viscosidade,  $M_v$ .



**Figura 6.11 – Apresentação do somatório do momento devido às forças de pressão aplicado nas pás da turbina para cada TSR.**



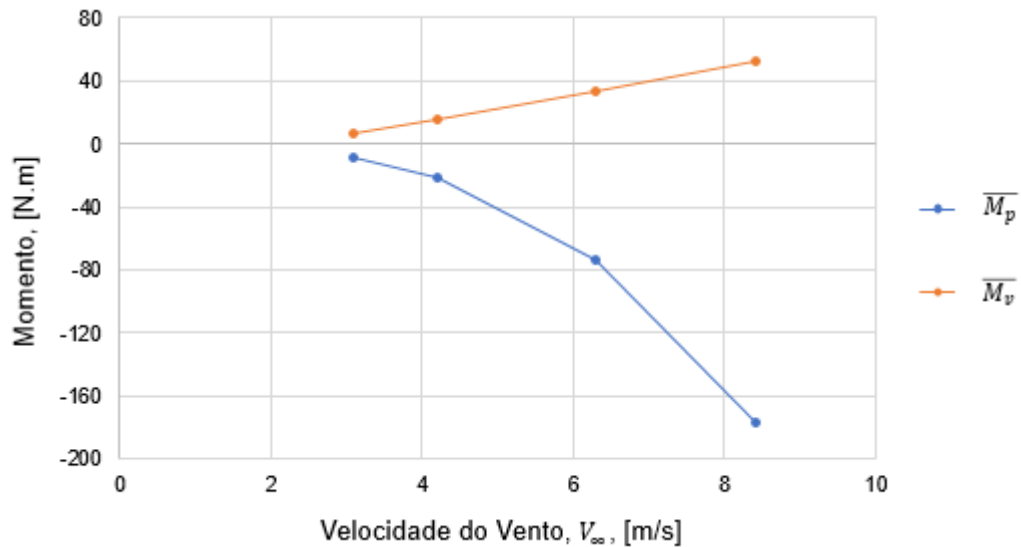


**Figura 6.12 – Apresentação do somatório do momento devido às forças viscosas aplicado nas pás da turbina para cada  $TSR$ .**

Os somatórios dos momentos devido às forças de pressão e devido às forças viscosas são calculados, cada um, tendo em conta as respetivas forças de pressão e de viscosidade exercidas nas pás da turbina em cada posição  $\theta$ . Pela Figura 6.11 e pela Figura 6.12, observa-se que os somatórios dos momentos oscilam, pois a intensidade, direção e sentido dessas forças resultantes ao longo da rotação da turbina variam, conforme apresentado na Figura 2.8. Por outro lado, a passagem de uma pá numa dada posição  $\theta$  influencia as propriedades do escoamento para a outra pá que passará no momento a seguir pela mesma posição.

O eixo das abcissas corresponde ao número de iterações realizadas durante as simulações. Esse número não é o mesmo de simulação para simulação, visto que, a velocidade do vento é diferente em cada  $TSR$ , logo para manter o mesmo número máximo de *Courant* em todas as simulações, o número de passos de tempo altera-se, como pode ser confirmado pela equação (4.17).

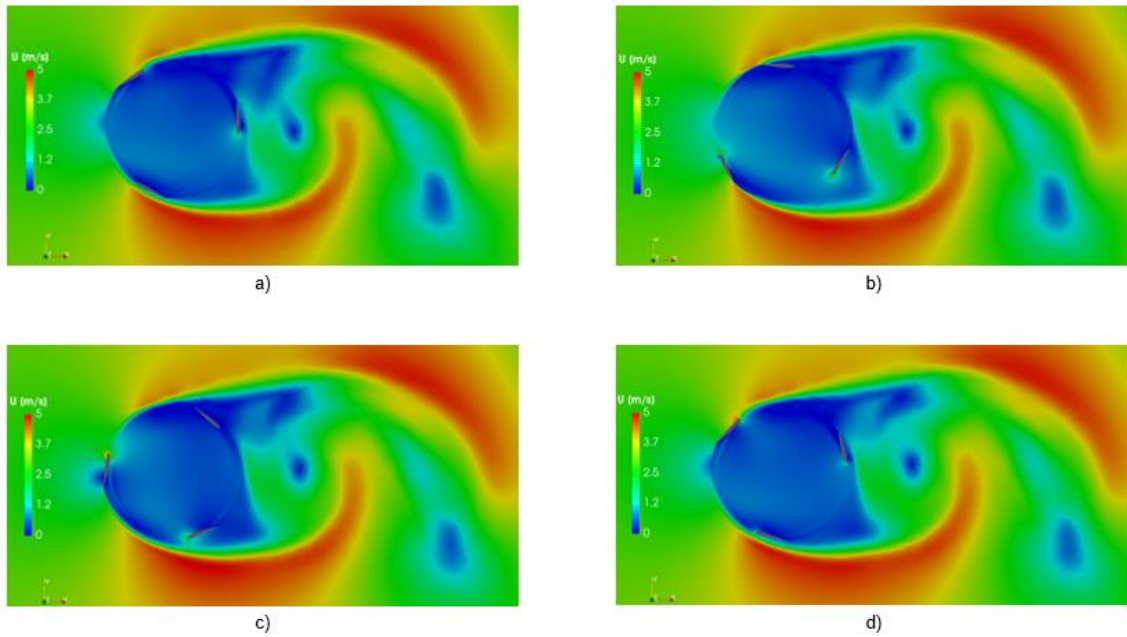
De modo a determinar o binário médio da turbina é necessário saber a média dos somatórios dos momentos aplicados nas pás da turbina. Assim, na Figura 6.13, é possível observar a evolução e os valores desses momentos.



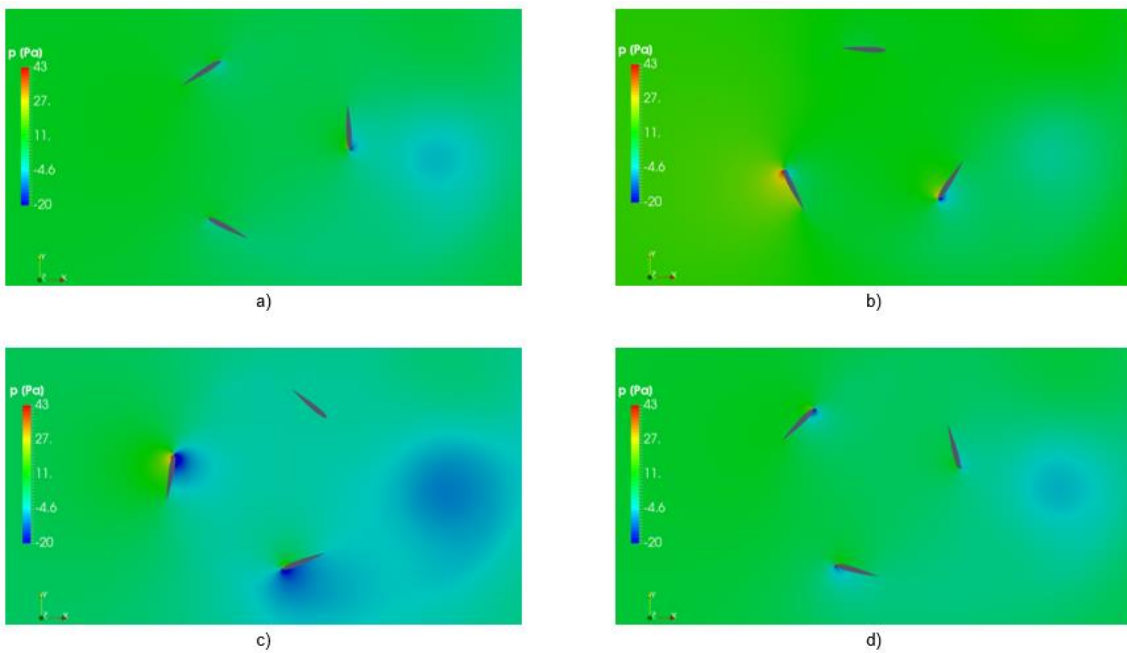
**Figura 6.13 – Evolução dos momentos médios versus a velocidade do vento.**

Como se pode ver através da Figura 6.13, a média dos somatórios dos momentos devido às forças de pressão e devido às forças viscosas do escoamento aumentam, em módulo, com o aumento da velocidade do vento. Sendo que o primeiro aumenta cerca de três vezes mais em relação ao segundo. Ou seja, o aumento da velocidade do vento influencia mais as forças de pressão do que as forças viscosas. O facto da média dos somatórios de ambos os momentos terem os respetivos sinais é devido ao sentido de rotação da turbina, pois esta roda no sentido horário (sentido negativo). O somatório do momento devido às forças viscosas aumenta com a velocidade do escoamento não perturbado, isto porque as tensões de atrito viscosas aumentam com o gradiente de velocidade. Em relação ao somatório do momento devido às forças de pressão, aumenta em módulo com o aumento de velocidade do escoamento não perturbado.

Para uma melhor compreensão da variação da velocidade e da pressão do escoamento ao longo da rotação das pás são apresentadas a Figura 6.14 e a Figura 6.15, respetivamente. Ambas correspondem à simulação 13 ( $TSR = 4$ ).



**Figura 6.14 – Variação da velocidade do escoamento ao longo da rotação das pás ( $TSR = 4$ ).**



**Figura 6.15 – Variação da pressão relativa do escoamento ao longo da rotação das pás ( $TSR = 4$ ).**

Perante a Figura 6.14, verifica-se que no interior da turbina a velocidade do escoamento é aproximadamente zero, pois a rotação das pás obriga que o escoamento as contorne.

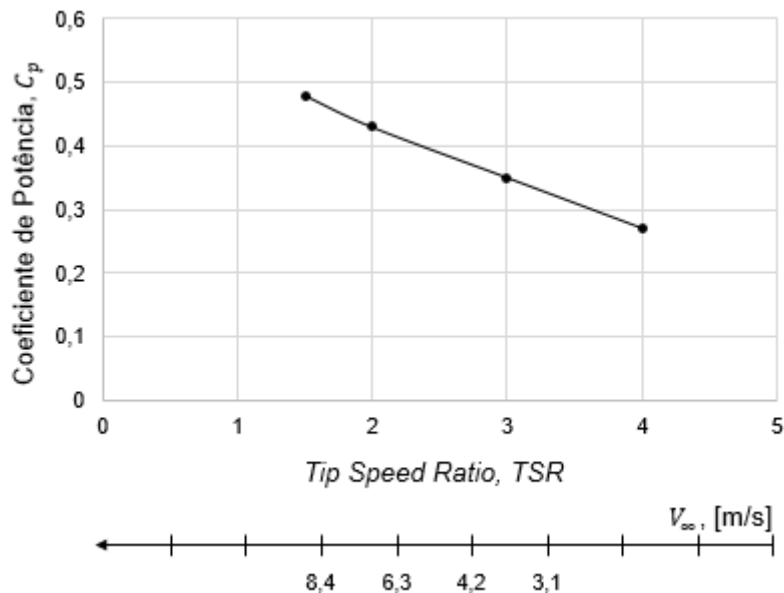
Apresentada a variação do somatório dos momentos consoante a velocidade do vento é possível determinar o binário médio e, conseqüentemente, a potência média da turbina e o coeficiente de potência médio. Os resultados apresentados na Tabela 6.10, têm em conta a área varrida pelas pás que é obtida pelo produto entre o diâmetro das pás da turbina e o

comprimento (ou envergadura) das mesmas. O comprimento das pás da turbina, como referido anteriormente, é 1m, permitindo recalcular os resultados para o comprimento desejado.

**Tabela 6.10 – Apresentação dos cálculos baseados nos resultados obtidos.**

<i>TSR</i>	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_\infty$ , [m/s]	Momentos Médios, [N.m]		Binário Médio, $\bar{B}$ , [N.m]	Potência Média da Turbina, $\bar{P}_{turbina}$ , [W]	Coeficiente de Potência Médio, $\bar{C}_p$
		$\bar{M}_p$	$\bar{M}_v$			
1,5	8,4	-160	50	-110	691	0,48
2	6,3	-74	33	-41	257	0,43
3	4,2	-27	17	-10	63	0,35
4	3,1	-12	9	-3	19	0,27

Perante a Tabela 6.10, é possível verificar que o coeficiente de potência médio cresce com o aumento da velocidade do vento, como apresentado na Figura 6.16.



**Figura 6.16 – Coeficiente de potência médio versus *Tip Speed Ratio*.**

A Figura 2.5, apresenta a evolução geral do coeficiente de potência em função do *TSR* para as turbinas *Darrieus*, no entanto, ajustando alguns parâmetros de funcionamento (como a solidez,  $\sigma$ , o número de pás,  $N$ , o perfil das pás, etc.) é possível ajustar essa evolução de modo a potenciar a turbina para um determinado intervalo de *TSR*. No capítulo 3 é feito esse trabalho, no sentido de retirar o melhor aproveitamento da turbina para o intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$ . Em suma, os resultados obtidos neste trabalho, presentes na Tabela 6.10, podem ser comparados com outros resultados numéricos, nomeadamente, a Figura 3.7, onde está representada a curva de  $C_p$  com a solidez utilizada nestas simulações,  $\sigma = 0,5$ .

Comparando ambos os resultados, observa-se que as curvas que representam o coeficiente de potência,  $C_p$ , versus o *TSR*, assumem comportamentos distintos. A curva obtida

neste trabalho assume apenas um comportamento decrescente à medida que o  $TSR$  aumenta. Já as curvas da Figura 2.5 (Turbina *Darrieus*) e da Figura 3.7, com o aumento do  $TSR$ , têm uma fase crescente, até atingir o valor de  $C_{p\text{ máx}}$ , e depois uma fase decrescente. Para além disso, perante os resultados obtidos (Tabela 6.10 e Figura 6.16), constata-se que o valor de  $C_{p\text{ máx}}$  é atingido para  $TSR = 1,5$ . Estes factos permitem concluir que a partir de uma velocidade de vento de  $5,25\text{ m/s}$ , aproximadamente, correspondente a um valor de  $TSR$  compreendido entre 2 e 3 e, tendo em conta toda a formulação apresentada neste capítulo, o *OpenFOAM* não converge para uma boa solução. Pois entre  $1,5 \leq TSR \leq 2,5$ , aproximadamente, o comportamento da curva deveria ser crescente até atingir o valor de  $C_{p\text{ máx}}$ . Ou seja, o OF apenas converge para uma boa solução entre  $3 \leq TSR \leq 4$  (baixas velocidades de vento), correspondente à fase decrescente.

As razões pelas quais o OF não converge para uma boa solução são apresentadas de seguida. Primeiramente e como já foi referido através da Figura 6.2, concluiu-se que quanto maior é a velocidade de vento maior é a variação do número de *Reynolds* ao longo da rotação das pás e, por conseguinte, maior é a variação das propriedades do escoamento junto à superfície das mesmas. Essa variação provoca uma maior complexidade de cálculo das forças e dos respetivos momentos por parte do *OpenFOAM*, dando origem a uma maior probabilidade de erro. Para além disso, a passagem de uma das pás numa determinada posição  $\theta$  afeta as propriedades do escoamento, assim, quando a próxima pá passar nessa mesma posição o OF tem que ter em conta essa variação, dificultando o cálculo das forças de pressão e de viscosidade junto à superfície dessa segunda pá.

Outra razão está relacionada com o refinamento e as dimensões da malha. Isto é, sabe-se que quanto menor for o espaçamento entre cada célula, maior é o tempo de simulação, a exigência computacional durante o processamento de dados e a precisão dos resultados obtidos. No entanto, numa primeira fase de estudo, é necessário ajustar muito bem o tempo de simulação com as capacidades gráficas do computador, de modo a cumprir com todos os objetivos dentro do tempo estipulado. As zonas onde são importantes terem uma malha mais refinada é junto às pás, na camada limite, onde ocorrem as maiores variações de pressão e velocidade do escoamento e no bordo de fuga das pás, onde se inicia a criação de vórtices com o intuito de acompanhar as suas evoluções.

Por outro lado, o modelo de turbulência utilizado, com uma única equação de transporte, simplifica mais o processo de cálculo por parte do OF em comparação com outros modelos que utilizam duas equações de transporte. No entanto, caso se utilizasse um modelo de turbulência com duas equações de transporte o tempo de simulação e a exigência computacional eram muito superiores, não conseguindo atingir os objetivos propostos.

### 6.4.2 Escoamento em Torno das Pás da Turbina *Darrieus* Rotor-H com Um Cilindro em Rotação

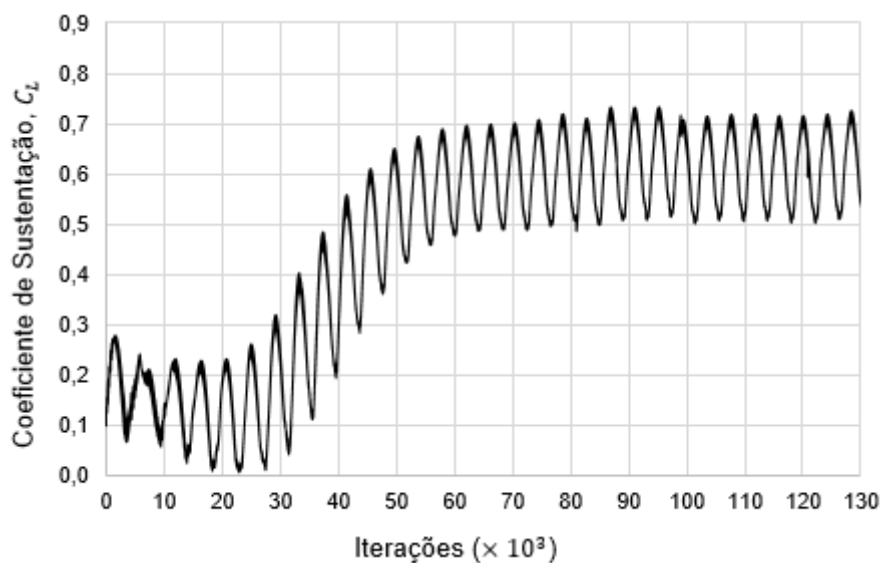
No presente subcapítulo pretende-se, numa primeira aproximação, simular o conceito da família de configurações B, onde para além das pás da turbina existe um cilindro em rotação, cujo eixo de rotação coincide com o eixo de rotação da turbina, simbolizando o balão cilíndrico. Na Tabela 6.11 é possível observar as características da última simulação.

**Tabela 6.11 – Características da simulação para o segundo caso de estudo da turbina.**

Simulação	Velocidade do Escoamento não Perturbado, $V_{\infty}$ , [m/s]	Diâmetro da Turbina, $D$ , [m]	TSR	Velocidade Angular da Turbina, $\omega$	
				[rad/s]	[RPM]
14	6,28	8	4	6,28	60

Neste caso de estudo realiza-se apenas uma simulação para uma velocidade angular de 60RPM. Isto porque, tendo em conta os resultados obtidos no subcapítulo anterior e as respetivas conclusões, o objetivo desta simulação é analisar a influência que a ação da turbina tem no efeito *Magnus* presente no cilindro, embora com um certo erro associado. Através da Tabela 6.11, é possível verificar que a velocidade do escoamento é superior a  $5,25\text{m/s}$  e, portanto, o OF não converge para uma boa solução em relação ao rendimento da turbina.

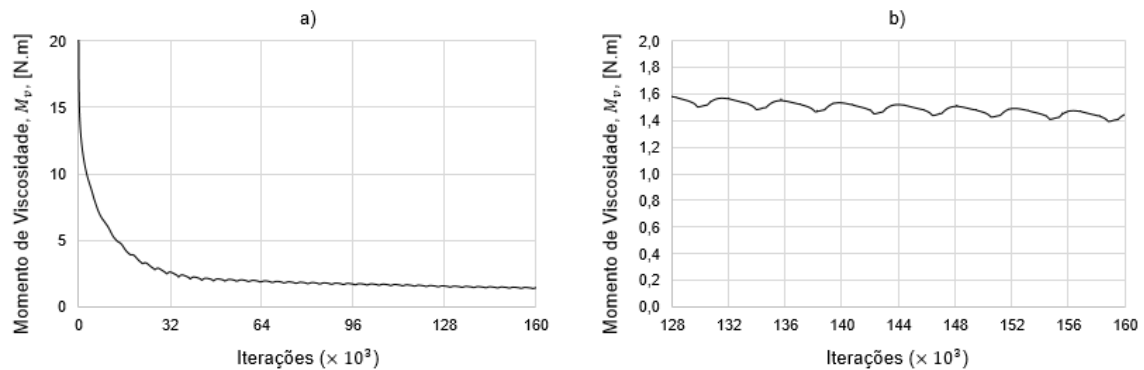
Nesse sentido, de modo a analisar o efeito *Magnus* no cilindro quando este é sujeito ao funcionamento da turbina é necessário observar o comportamento da força de sustentação. Assim, na Figura 6.17, é apresentado o coeficiente de sustentação do cilindro.



**Figura 6.17 – Coeficiente de sustentação referente ao segundo caso de estudo da turbina.**

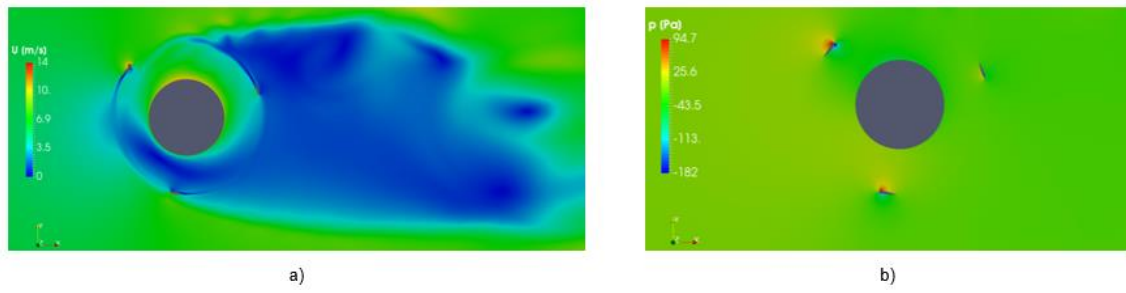
Perante a Figura 6.17, verifica-se que o regime periódico é atingido, aproximadamente, ao fim de 80000 iterações, sendo que o coeficiente de sustentação médio,  $\overline{C_L}$ , corresponde a 0,6. Ao comparar este resultado com o caso do escoamento em torno do cilindro em rotação ( $V_\infty = 6,3m/s$ ), presente na Tabela 5.17, constata-se que o coeficiente de sustentação é cerca de seis vezes inferior e, por conseguinte, a força de sustentação também. Isto permite concluir que o efeito *Magnus* no cilindro é muito influenciado pela ação da turbina, ou seja, a força de sustentação que anteriormente existia no balão para elevar a plataforma aérea, diminui abruptamente. Pelo que, a força que mais contribui para elevar a plataforma aérea no presente caso é a força de sustentação criada pela rotação das pás da turbina.

Finalizando, resta determinar a potência necessária a fornecer ao cilindro de maneira que tenha uma rotação de 60RPM. Assim, é apresentado na Figura 6.18, o momento devido às forças viscosas do cilindro.



**Figura 6.18 – Momento devido às forças viscosas do cilindro referente ao segundo caso de estudo da turbina.**

Perante a Figura 6.18, verifica-se que a partir das 128000 iterações o momento devido às forças viscosas varia muito pouco, sendo que o valor médio nesse intervalo corresponde, aproximadamente, a 1,5N.m. Comparando com os resultados obtidos no caso do cilindro (presente na Tabela 5.18, simulação 7), o momento devido às forças viscosas médio, neste caso, diminui cerca de 2,4 vezes. Visto que o diâmetro do cilindro é o mesmo, conclui-se que a potência necessária a fornecer ao cilindro é cerca de 2,4 vezes inferior, comparativamente, ao caso onde não está presente a turbina *Darrieus*. Este facto justifica-se devido ao funcionamento da turbina, ou seja, como é visível na Figura 6.14 (sem o cilindro em rotação) a velocidade do escoamento no interior da turbina é bastante baixa e na Figura 6.19 (com o cilindro em rotação) a velocidade do escoamento também é baixa na zona inferior do cilindro. Logo o gradiente de velocidades e, por conseguinte, as tensões de atrito viscosas e as forças viscosas diminuem. Logo, para uma mesma velocidade de vento a potência necessária a fornecer ao cilindro, para que este possua uma velocidade angular de 60RPM, diminui devido à ação da turbina. Por outro lado, a diferença de pressões é maior na zona das pás do que na superfície do cilindro.



**Figura 6.19 – a) Variação da intensidade da velocidade do escoamento; b) Variação da pressão relativa do escoamento.**



## 7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusão

Inicialmente foi apresentado o projeto desenvolvido pela *Omnidea*, o conceito da plataforma aérea, as suas funções, o seu funcionamento através do efeito *Magnus* e a ambição que a empresa tem para o futuro. Ao aliar essa ambição com algumas limitações existentes no atual sistema de produção de energia, surgiu a necessidade de implementar um novo modelo na plataforma aérea.

Nesse sentido e tendo em conta as condições de funcionamento da plataforma aérea, definiu-se duas famílias de configurações (A e B) para implementar no novo modelo da plataforma aérea. Numa primeira aproximação, pode-se considerar que na família de configurações A o efeito *Magnus* em cada balão não é afetado pela ação da turbina, havendo alguma liberdade entre estes dois conjuntos. Na família de configurações B o efeito *Magnus* em cada balão é muito afetado pela ação da turbina, visto que, o vento incide maioritariamente nas pás da turbina.

No atual modelo genérico da plataforma aérea o motor consome, aproximadamente, 0,3kW e 1kW para colocar o balão a 25RPM e 50RPM, respetivamente. Posto isto, pretendeu-se analisar as dimensões de uma turbina *Darrieus* rotor-H (comprimento das pás versus o diâmetro) de modo que esta produza no mínimo a energia equivalente ao consumo do motor com as mesmas velocidades angulares acima mencionadas e sujeita a várias velocidades de vento. Assim, a energia utilizada para a rotação do balão é proveniente de fonte renovável e não poluente. Concluiu-se que existem algumas limitações tendo em conta as condições impostas e, portanto, só é possível atingir o objetivo proposto no caso de a turbina possuir uma velocidade angular de 50RPM, tiver um diâmetro de 10m, um comprimento de pás de 12m e se operar com velocidades de vento de 4m/s a 8m/s.

Posteriormente, de maneira a dar seguimento ao estudo das duas famílias de configurações, considerou-se, numa primeira fase de estudo, que a turbina tem a mesma velocidade angular de cada balão (velocidade padrão de 60RPM). De seguida, através da curva de distribuição de *Weibull*, concluiu-se que 80% das velocidades de vento registadas no local de operação da turbina, num período equivalente a um ano, estão no intervalo de 0m/s a 20m/s. Relacionando a velocidade angular da turbina com a distribuição probabilística das velocidades, verificou-se que no intervalo  $1,5 \leq TSR \leq 5$  é onde se encontram no mínimo cerca de 70% das velocidades de vento registadas no local de operação da turbina. Logo os parâmetros de funcionamento da turbina foram estudados de modo a maximizar o coeficiente de potência da turbina para esse intervalo.

Na segunda parte da presente dissertação foram realizadas simulações numéricas a dois casos distintos: o caso do cilindro e o caso da turbina. Um dos casos de estudo do cilindro teve como objetivo analisar o comportamento do modelo genérico da atual plataforma aérea nas fases de decolagem e aterragem e, por isso, simulou-se o escoamento em torno de um cilindro estacionário. Os resultados obtidos do coeficiente de arrasto médio, quando comparados com resultados experimentais, tiveram um erro máximo de 42%. No entanto, quando se compara resultados numéricos com resultados experimentais há que ter em conta alguns aspetos. Entre eles, a bidimensionalidade do estudo numérico, isto é, o escoamento evolui e varia as suas propriedades apenas segundo duas componentes (neste caso,  $x$  e  $y$ ). O modelo de turbulência, que simula o efeito de turbulência no escoamento e as variações das suas propriedades. A malha utilizada pode não estar suficientemente refinada nas zonas de maior interesse, como por exemplo, na camada limite e na zona de formação de vórtices, a própria dimensão da malha tem que ter as dimensões necessárias para evitar o efeito de bloqueamento. Por outro lado, os números de *Reynolds* das simulações estão situados na fase em que ocorre a transição da camada limite laminar para turbulenta na superfície do cilindro (*drag crisis*) o que dificulta o processamento de cálculo por parte do *OpenFOAM*. Ainda assim, através dos resultados do coeficiente de sustentação, permitiu concluir que quanto maior for a velocidade do vento, maior é o número de movimentos ascendentes e descendentes da plataforma aérea. Por outro lado, a distância percorrida nesses movimentos é superior para menores velocidades de vento. Neste caso, há também a libertação de vórtices constantes.

No segundo caso de estudo do cilindro pretendeu-se simular o funcionamento da plataforma aérea em alta altitude e a sua transição da média altitude para a alta altitude. Assim, simulou-se o escoamento em torno de um cilindro em rotação para várias velocidades angulares e várias velocidades de vento. Para além disso, o problema em questão permitiu comprovar as duas condições do efeito *Magnus*: a força de sustentação é proporcional à velocidade do vento e à velocidade angular do cilindro. Uma das dificuldades ao longo deste caso foi encontrar na literatura um estudo semelhante que pudesse validar ou comparar os resultados obtidos neste trabalho. Relativamente aos resultados, concluiu-se de facto, quanto maior for a velocidade angular do cilindro e a velocidade do vento, maior é o coeficiente de sustentação e menor é o coeficiente de arrasto. Por outro lado, quando o cilindro está em rotação há uma menor perturbação do escoamento e os vórtices são substituídos por uma esteira.

Por fim, de modo a dar continuidade ao estudo das duas famílias de configurações, efetuou-se a simulação do caso da turbina que também se divide em dois casos de estudo. O primeiro corresponde, numa primeira fase, à família de configurações A, em que é simulado o escoamento em torno das pás da turbina *Darrieus* rotor-H e determinado o seu coeficiente de potência. Perante os resultados obtidos, verifica-se que apesar de serem inferiores ao limite de *Betz*, a partir de velocidades de vento de 5m/s não são coerentes com os resultados da literatura. A divergência de resultados pode dever-se a vários fatores, entre eles a

complexidade do problema, uma vez que é necessário colocar a malha em rotação o que implica sempre erros associados. Outro fator é o aumento da variação do número de *Reynolds*, ao longo da rotação das pás, à medida que a velocidade do vento aumenta e a constante variação das propriedades do escoamento sempre que as pás passam por uma determinada posição o que torna o processamento de cálculo do *OpenFOAM* mais complexo e demorado.

O último caso de estudo teve como objetivo analisar a variação das propriedades do escoamento na camada limite do cilindro e determinar a força de sustentação, tendo em conta o funcionamento da turbina. Posteriormente, essa força foi comparada apenas com o cilindro em rotação e permitiu concluir que a ação da turbina tem influência no efeito *Magnus* presente no cilindro, pois a força de sustentação é cerca de 6 vezes inferior à força criada sem a presença das pás. Ou seja, a principal funcionalidade do balão, neste caso, é fornecer alguma flutuabilidade ao sistema, pois a força de sustentação que possibilita a elevação da plataforma aérea provém da ação da turbina. Em consequência do funcionamento da turbina, o momento devido às forças viscosas do cilindro diminui, quando comparado com o momento devido às forças viscosas do cilindro sem a presença das pás. Logo, a potência necessária a fornecer ao cilindro também diminui.

## 7.2 Trabalhos Futuros

Esta dissertação serve como ponto de partida para trabalhos futuros, com o objetivo de analisar as vantagens e desvantagens da utilização de uma turbina *Darrieus* no atual modelo da plataforma aérea.

Posto isto, fica como sugestão um estudo estrutural às duas famílias de configurações, de modo a determinar os pontos de fixação da turbina à plataforma aérea e avaliar os eventuais problemas de ressonância.

Outra sugestão ainda é elaborar um protótipo de uma turbina *Darrieus* rotor-H e realizar um estudo experimental ou através de um túnel de vento, com o intuito de obter resultados da eficiência das duas famílias de configurações. Posteriormente, poderão ser comparados aos resultados deste trabalho para baixas velocidades de vento.



## Referências Bibliográficas

- [1] Hably, A., Dumon, J. e Smith, G., “Control of an airborne wind energy system with Magnus effect”, *Conference paper*, 2016.
- [2] Seifert, J. e Luftfahrt e.V., B., “Aerodynamic analysis of a new hybrid rotor”, Germany Boltzmannstr, 15, 85748, Garching.
- [3] <http://omnidea.net/site/index.php>
- [4] Oliveira, L. A. e Lopes, A. G., “Mecânica dos Fluidos”, 4ª Edição, 2013.
- [5] Penedo, R. J. M., Pardal, T. C. D., Silva, P. M. M. S., Fernandes, N. M. e Fernandes, T. R. C., “Airborne Wind Energy – High Altitude Wind Energy from a Hybrid Lighter-than-Air Platform Using the Magnus Effect”, *Green Energy and Technology*, 2014.
- [6] Müller-Steinhagen, H. e Nitsch, J., “The contribution of renewable energies to a sustainable energy economy”, *Process Safety and Environmental Protection*, 83, 2005.
- [7] *International Energy Agency*, “Key world energy statistics”, 2016.
- [8] Hussain, A., Arif, S. M. e Aslam, M., “Emerging renewable and sustainable energy technologies: state of the art”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71, pp. 12-28, 2017.
- [9] Vaz, D. C., “Sebenta – Energia e Ambiente”, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2016.
- [10] Khan, Z. e Rehan, M., “Harnessing Airborne Wind Energy: Prospects and Challenges”, *Brazilian Society for Automatics – SBA*, 2016.
- [11] “Renewables Global Status Report”, *Renewable Energy Policy Network*, 2015
- [12] Wagner, H. J. e Mathur, J., “Introduction to Wind Energy Systems”, *Green Energy and Technology*, 2009.
- [13] Marçal, D. B. A., “Estudo numérico de uma pequena turbina eólica de rotor tipo H”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2012.
- [14] Wahl, M., “Designing na H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station”, Uppsala Universitet, Suécia, 2007.
- [15] Chen, Y. e Lian, Y., “Numerical investigation of vortex Dynamics in na H-rotor vertical axis wind turbine”, *Engineering Applications of Computacional Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 21-32, 2015.
- [16] Eriksson, S., Bernhoff, H. e Leijon, M., “Evaluation of different turbine concepts for wind power”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 1419-1434, 2008.
- [17] Schaffarczyk, A. P., “Introduction to Wind Turbines Aerodynamics”, *Green Energy and Technology*, Capítulo 2, 2014.
- [18] White, F. M., “Fluid Mechanics”, 7ª edição, 2011.

- [19] Silva, G. B. O., “Desenvolvimento de uma Turbina Eólica de Eixo Vertical”, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011.
- [20] Johnson, S. J., Van Dam, C. P. e Berg, D. E., “Active Load Control Techniques for Wind Turbines”, *Sandia National Laboratories*, SAND2008-4809, 2008.
- [21] Ôlo, C. D. V., “Projeto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida”, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2012.
- [22] Islam, M., Ting, D. S. K. e Fartaj, A., “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 1087-1109, 2008.
- [23] Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Tameghe, T. A. e Ekemb, G., “A new approach for modeling Darrieus-type vertical axis wind turbine rotors using electrical equivalent circuit analogy: basis of theoretical formulations and model development”, *Energies*, Vol. 8, pp. 10684-10717, 2015.
- [24] Dyachuk, E., Rossander, M., Goude, A. e Bernhoff, H., “Measurements of the Aerodynamic Normal Forces on a 12kW Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine”, *Energies*, Vol. 8, pp. 8482-8496, 2015.
- [25] Liang, Y., Zhang, L., Li, E., Liu, X. e Yang, Y., “Design Considerations of Rotor Configuration for Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines”, *Hindawi Publishing Corporation*, 2014.
- [26] Kirke, B. K., “Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications”, *Griffith University*, 1998.
- [27] Brusca, S., Lanzafame, R. e Messina, M., “Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine’s performance”, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, Vol. 5, pp. 333-340, 2014.
- [28] Ghasemian, M., Ashrafi, Z. N. e Sedaghat, A., “A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 149, pp. 87-100, 2017.
- [29] Conde, J. M. P., “Aula: Dinâmica de Fluidos I, Dinâmica – Escoamentos laminar e turbulento”, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2014.
- [30] Faria, T. M. G. A., “Modelação Numérica de Escoamentos Sobre Descarregadores em Degraus”, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- [31] Moreira, T. M., “Contribuição para a validação do código numérico OpenFOAM em escoamentos com superfície livre”, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNL, Almada, Portugal, 2012.
- [32] Gonçalves, N. D. F., “Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas”, Faculdades de Ciências da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.
- [33] Plataforma online GitHub (acedido em 26 de Abril de 2017).  
[https://github.com/openfoamtutorials/OpenFOAM\\_Tutorials\\_/tree/master/MagnusEffect](https://github.com/openfoamtutorials/OpenFOAM_Tutorials_/tree/master/MagnusEffect).
- [34] Plataforma CFD online (acedido em 10 de Maio de 2017).  
[https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model).

- [35] Plataforma CFD online (acedido em 12 de Maio de 2017).  
[https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_kinetic\\_energy](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_kinetic_energy).
- [36] Plataforma CFD online (acedido em 12 de Maio de 2017).  
[https://www.cfd-online.com/Wiki/Specific\\_turbulence\\_dissipation\\_rate](https://www.cfd-online.com/Wiki/Specific_turbulence_dissipation_rate).
- [37] Plataforma CFD online (acedido em 15 de Maio de 2017).  
[https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_intensity](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity).
- [38] Plataforma CFD online – *OpenFOAM* (acedido em 16 de Maio de 2017).  
<http://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html>.
- [39] Yuce, M. I. e Kareem, D. A., “A Numerical Analysis of Fluid Around Circular and Square Cylinders”, *Journal Awwa*, American Water Works Association, 2016.
- [40] Perkovic, L., Silva, P., Ban, M., Kranjcevic, N. e Duic, N., “Harvesting high altitude wind energy for power production: The concept based on Magnus’ effect”, *Applied Energy*, Vol. 101, pp. 151-160, 2013.
- [41] Plataforma online GitHub (acedido em 28 de Junho de 2017).  
<https://github.com/traviscarrigan/OpenFOAM-2D-VAWT>.
- [42] Patel, Y., “Numerical Investigation of Flow Past a Circular Cylinder and in a Staggered Tube Bundle Using Various Turbulence Models”, *Lappeenranta University of Technology*, Finlândia, 2010.
- [43] Plataforma CFD online (acedido em 6 de Julho de 2017).  
[https://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras_model).
- [44] Zadeh, S. N., Komeili, M. e Paraschivoiu, M., “Mesh Convergence for 2-D Straight-Blade Vertical Axis Wind Turbine Simulations and Estimation for 3-D Simulations”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 38, No. 4, 2014.
- [45] Plataforma online (acedido em 6 de Julho de 2017).  
<https://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>.